

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

# **Kompozitní materiály v letectví**

## **Composite Materials in Aviation**

Student:

Jan Geryk

Vedoucí bakalářské práce:

Mgr. Karel Szydłowski

# Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Geryk**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R038 Technologie údržby letecké techniky

Téma: Kompozitní materiály v letectví  
Composite Materials in Aviation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Charakterizovat způsoby a podmínky oprav kompozitních materiálů používaných na konstrukci velkých letadlech se zaměřením na typ CFRP.

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Letecké kompozitní materiály obecně.
3. Použití a aplikace na letadle.
4. Vyhledávání a diagnostika závad kompozitu typu CFRP.
5. Postupy opravy kompozitu typu CFRP použitého na konstrukci velkého letadla.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Ehrenstein, G., W. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.  
Friedrich, K. Friction and Wear of Polymer Composites. Amsterdam: Elsevier, 1986. ISBN 0-444-42524-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Karel Szydłowski**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Ostravě dne 15. května 2019.

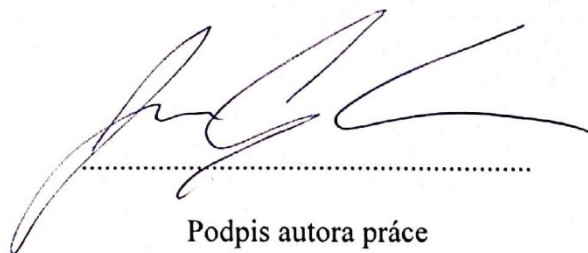


Jan Geryk

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou\*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou\*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské\*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská\*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Geryk

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Staříč 767, Staříč 739 43

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

GERYK, J. *Kompozitní materiály v letectví: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2019, 51 s. Vedoucí práce: Szydłowski, K.

Bakalářská práce je zaměřena na kompozitní materiály používané v letectví, jejich základní rozdělení, charakteristiky a aplikace jednotlivých druhů na konstrukci draku letadla. Dále jsou detailněji popsány vyztužující vlákna (přírodní, skleněná, polymerní, uhlíková) a jejich historie použití. Práce se navíc zabývá vyhledáváním závad a poškození na konstrukci draku letadla s možnostmi jejich oprav. V závěru je popsán postup opravy řídícího prvku z kompozitního materiálu sendvičové konstrukce.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

GERYK, J. *Composite Materials in Aviation: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, The Institute of Transport, 2019, 51 p. Thesis head: Szydłowski, K.

This bachelor thesis is focused on composite materials used in aviation, their basic division, characteristics and application on airframe structures. Furthermore, common types of reinforcing fibers (natural, glass, polymer, carbon) are described in more detail as well as their use history. Additionally, the thesis is aimed at ways of detecting and repairing the defects and damages on the airframe structure. The conclusion contains a repair procedure of sandwich-constructed composite material control element.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Letecké kompozitní materiály obecně.....</b>	<b>14</b>
1.1.	Rozdělení kompozitních materiálů .....	14
1.2.	Adheze v kompozitech.....	16
1.3.	Vlákna v kompozitním materiálu .....	17
<b>3</b>	<b>Použití a aplikace na letadle .....</b>	<b>20</b>
3.1	Skleněná vlákna - GFRP.....	23
3.1.1	Skleněná vlákna z bez alkalické skloviny .....	24
3.1.2	Popis výroby skleněných vláken .....	25
3.2	Křemíková vlákna QFRP .....	27
3.3	Polymerní vlákna .....	28
3.3.1	Aramidová vlákna (AF).....	28
3.4	Uhlíková vlákna (Carbon Fiber) .....	30
3.4.1	Vlákna typu PAN .....	31
3.4.2	Vlákna na základě smoly (mezofáze).....	34
3.4.3	Charakteristika vláken vysokých parametrů .....	35
3.4.4	Vlákno – pryskyřice .....	36
3.4.5	Aplikace uhlíkových kompozitů na letadle .....	36
<b>4</b>	<b>Vyhledávání a diagnostika závad kompozitu typu CRFP.....</b>	<b>37</b>
4.1.1	Vady kompozitů .....	37
4.2	Vizuální kontrola (VT) .....	40
4.2.1	Všeobecná vizuální prohlídka. ....	41
4.2.2	Přímá vizuální kontrola .....	41
4.2.3	Nepřímá vizuální kontrola.....	42
4.2.4	Ověřování podmínek vizuální zkoušky .....	42
4.2.5	Vyhodnocení nálezů .....	43

4.3	Tap test inspekce.....	43
4.4	Ultrazvuková kontrola (UT) .....	44
4.4.1	Teoretický úvod.....	45
4.4.2	Měřicí techniky.....	46
4.4.3	Impulzová odrazová technika.....	46
4.4.4	Ultrazvukové testovací zařízení .....	47
4.4.5	Ultrazvukové sondy.....	48
4.4.6	Phased Array (UT-PA) .....	49
4.4.7	Laserem buzený ultrazvuk.....	50
4.4.8	Imersní zkoušení.....	52
<b>5</b>	<b>Postupy opravy kompozitu typu CFRP použitého na konstrukci velkého letadla. 54</b>	
5.1	Oprava kompozitního materiálu. ....	54
5.2	Dílčí kroky .....	54
5.2.1	Prohlídka dílu .....	54
5.2.2	Práce s technickou dokumentací (SRM), příprava před opravou. ....	55
5.2.3	Postup opravy .....	56
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>63</b>
	<b>Zdroje .....</b>	<b>65</b>



## Seznam použitých zkratk

AF	Aramid Fiber	Aramidové vlákno
AMM	Aircraft Maintenance Manual	Údržbový manuál letadla
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Uhlíkovým vláknem vyztužený polymer
CLC	Carbon Laminate Composite	Uhlíkový laminát
CLUE	Contact Laser Ultrasonic Evaluation	Laserem buzený ultrazvuk
CMC	Ceramic Matrix Composites	Keramická matrice
CVD	Chemical Vapor Deposition	Chemická depozice z plynné fáze
DET	Detailed	Detailní vizuální prohlídka
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Evropská agentura pro bezpečnost letectví
ET	Elektromagnetic Testing	Metoda vířivých proudů
GF	Glass Fiber	Skleněné vlákno
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer	Skleněným vláknem vyztužený polymer
GVI	General Visual Inspection	Všeobecná vizuální prohlídka
HM	High Module	Vysoko modulová
HT	High Tension	Vysoko napěťové
MEK	Methyl-Ethyl-Ketone	Methyl-Ethyl-Keton
MIA	Mechanical Impedance Analysis	Mechanická impedanční analýza
MMC	Metal Matrix Composites	Kovová matrice
MT	Magnetic Testing	Magnetická prášková metoda
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NDT	Non Destructive Testing	Nedestruktivní zkoušení
PAN	Polyacrylonitrile	Polyakrylonitril
PMC	Plastic Matrix Composites	Umělá matrice
PT	Penetration Testing	Kapilární zkoušení
QFRP	Quartz Fiber Reinforced Polymer	Křemíkovými vlákny vyztužený polymer
RT	Radiographic Testing	Prozařovací testování
SDI	Special Detailed	Speciálně detailní vizuální prohlídka
SRM	Structural Repair Manual	Manuál strukturálních oprav

UT	Ultrasonic Testing	Ultrazvukové testování
VF	-	Vysokofrekvenční
VT	Visual Testing	Vizuální prohlídka

## Seznam obrázků

obrázek 1 Vláknová disperze .....	15
obrázek 2 Desková disperze .....	15
obrázek 3 Příklad zaklínění matrice s disperzí .....	16
obrázek 4 Příklad vlastností přírodních vláken .....	17
obrázek 5 Bavlněné vláko, 300x zvětšeno, jde krásně vidět nepravidelnost jednotlivých vláken.....	17
obrázek 6 Rozdíl uhlíkových vláken .....	18
obrázek 7 Tabulka základních vlastností kevlarových a nylonových vláken .....	18
obrázek 8 Vlastnosti vybraných whiskerů .....	19
obrázek 9 Aplikace kompozitu na jednotlivých modelech. ....	21
Obrázek 10 Aplikace kompozitních materiálů Airbus A380 airbus .....	21
Obrázek 11 Aplikace kompozitních materiálů Boeing 787 Dreamliner .....	22
Obrázek 12 Aplikace kompozitních materiálů na letoun Embraer Legacy 650.....	22
Obrázek 13 Struktura skleněného vlákna.....	24
Obrázek 14 Schéma výroby textilních skleněných vláken tažením z trysek .....	25
Obrázek 15 Koroze E-vlákna a/b - koroze bez namáhání, c/d koroze s ohybovým namáháním.....	26
Obrázek 16 Rozdíl velikostí druhů křemíkových vláken.....	27
Obrázek 17 Makromolekula kevlaru.....	28
Obrázek 18 Schéma výroby aramidových vláken.....	29
Obrázek 19 Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken.....	30
Obrázek 20 Příklad opakujícího se polymeru .....	31
Obrázek 21 Schéma výroby PAN vláken.....	33
Obrázek 22 Obsah prvků v jednotlivých krocích.....	33
Obrázek 23 Nalevo metoda Plain weave, napravo metoda Harness satin. ....	35
Obrázek 24 Příklad delaminace v okolí rádiusu.....	38
Obrázek 25 Příklad porozity v kompozitu .....	38
Obrázek 26 Příklad mezi krystalické koroze hliníkového plechu s kompozitem vyztuženým skelnými vlákny .....	39
Obrázek 27 Přímá vizuální kontrola .....	42
Obrázek 28 Obyčejné tap testing kladívko (vlevo) a Wichitech RD3 digitalní tap testing kladívko (vpravo).....	44
Obrázek 29 Znázornění vln. ....	46

Obrázek 30 Ultrazvukové testování .....	47
Obrázek 31 Ukázka piezoelektrických ultrazvukových sond .....	49
Obrázek 32 Ukázka vyzařování sondy Phased array .....	50
Obrázek 33 Schéma laserem buzeného ultrazvuku.....	51
Obrázek 34 B-sken delaminace desetivrstvého uhlíkového kompozitu.....	51
Obrázek 35 Ukázka zjištěného poškození, patrný průraz a s tím spojená delaminace. .	54
Obrázek 36 Ukázka tabulky poškození .....	55
Obrázek 37 Zbroušené a vyfrézované poškození.....	56
Obrázek 38 Přeměření vyfrézovaného místa .....	56
Obrázek 39 Adhesivní pasta Hysol EA 9394S.....	57
Obrázek 40 Díra vyplněná adhesivní pastou Hysol .....	57
Obrázek 41 Připravená tkanina před nasycením pryskyřice .....	58
Obrázek 42 Pryskyřice Araldit .....	58
Obrázek 43 Nasycená tkanina kladená přes poškození v pěti vrstvách .....	59
Obrázek 44 Vytvrzování pryskyřice pod infračerveným zářičem .....	60
Obrázek 45 Vytvrdlý epoxid.....	61
Obrázek 46 Porovnání oprav .....	62

# 1 Úvod

Neustále se zvyšující nároky na technologickou vyspělost, životnost a tlak na co nejnižší spotřebu letadel, která je přímo úměrná hmotnosti použitých materiálů na konstrukci letadla, nutí konstruktéry velkých dopravních letadel k použití nových modernějších materiálů. Mezi tyto materiály se řadí takzvaný kompozitní materiál.

Užití kompozitů na konstrukci velkých dopravních letadlech značně narůstá. Z tohoto důvodu se již v blízké budoucnosti při těžké údržbě vyskytne větší počet oprav a tímto nastává potřeba vyškolit kvalifikovaný personál. Téma kompozitní materiály jsem si zvolil, protože se domnívám, že tento druh materiálů nemusí být všeobecně známý a je důležité se jimi zabývat. Jelikož jsem studentem studijního oboru zabývající se údržbou letadel, stanoveným cílem práce je ukázat, za jakých podmínek jsme schopni udržet takto vyrobenou konstrukci v provozu schopném stavu. Zaměřil jsem se na kompozitní materiály vyztužené vlákny, konkrétně na typ CFRP (uhlíkovým vláknem vyztužený kompozit) a to z důvodu nejvyššího uplatnění tohoto typu.

Bakalářská práce je rozdělena do jednotlivých kapitol. V první kapitole se čtenář seznámí s problematikou a definicí kompozitního materiálu. Ve stručnosti jsou zde popsány jednotlivé typy kompozitů, jejich složení, limity, výhody či nevýhody.

Ve druhé kapitole nazvané „Aplikace na letadle“ jsem sepsal historii použití tohoto materiálu v leteckém průmyslu. Následují příklady moderních konstrukcí a jejich dosavadní vývoj. Protože jsem se zaměřil na kompozity vyztužené vlákny, kde tyto vlákna mají značný význam, zabýval jsem se jimi detailněji.

V další části této práce je rozvedena diagnostika a vyhledávání závad. Zde jsem se zaměřil na diagnostiku a používání NDT metod čistě na uhlíkových kompozitech. Jsou zde sepsány jak metody běžně používané v provozu, tak i metody nebo techniky ve fázi testování.

V poslední části čtenář nalezne ukázkou opravy řídicího prvku vyrobeného z kompozitního materiálu sendvičového typu (konkrétně vyvažovací plocha výškového kormidla letadla SAAB 340). Je zde podrobně sepsán postup opravy konkrétního poškození. V závěru této kapitoly je porovnání konečného stavu opravy vykonané v souladu s manuály a předpisy výrobce oproti opravě provedené v rozporu s nařízením.

## 2 Letecké kompozitní materiály obecně

Jednoznačně správná a jediná definice kompozitních materiálů prozatím neexistuje. Slovo kompozit, komposit znamená: *složený z různých prvků, materiál vzniklý syntetickým propojením jednodušších materiálů*. Nejznámější definicí používanou ve Spojených státech amerických vytvořenou vojenskými vývojovými centry ve spolupráci s institutem NASA zní: „Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (to znamená, vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní“. (Daďourek, 2007, s.7)

Jedna z primárních charakteristik kompozitního materiálu je, že nikdy není vyroben pro univerzální použití a je projektován pro dané uplatnění. Všechny důležité parametry kompozitního materiálu záleží na jeho struktuře.

V dnešní době můžeme říct, že každý používaný materiál je kompozitem, neboť materiál v čisté formě se používá jen ve výjimečných případech (měď, hliník, grafit). Jako kompozitní materiál jsou považovány také různé deskové a laminované systémy.

### 1.1. Rozdělení kompozitních materiálů

Vzhledem k rozsáhlému složení kompozitních materiálů je zapotřebí k detailnějšímu popisu a uspořádání stanovit určitá kritéria dělení.

#### Podle typu matrice

Rozdělení podle typu matrice je považováno jako základní.

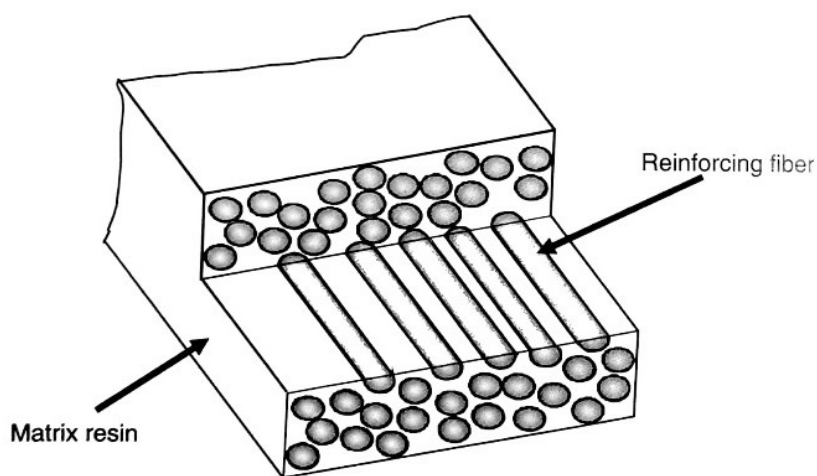
- Plastová matrice (Plastic Matrix Composites – PMC)
- Kovová matrice (Metal Matrix Composites – MMC)
- Keramická matrice (Ceramic Matrix Composites – CMC)

V praxi se můžeme setkat se skleněnou matricí, kterou z důvodu obdobných vlastností přiřazujeme ke kompozitům s CMC matricí. Matrice může být vyztužená různými příměsi (vlákny).

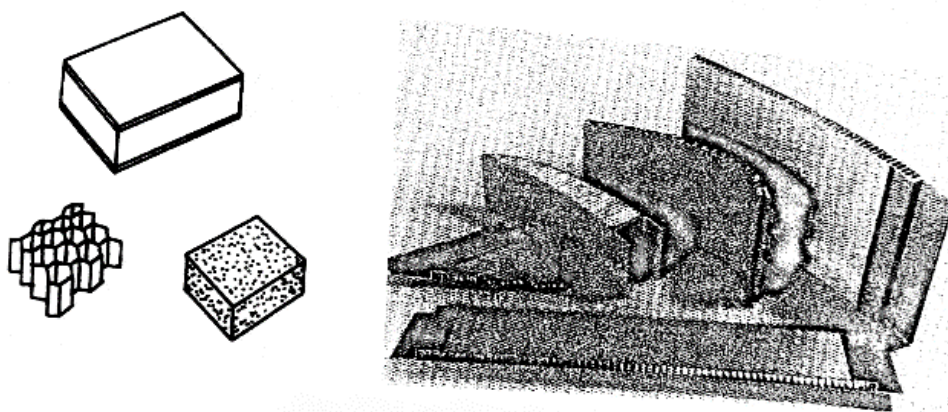
## Podle tvaru disperze

Uspořádání dílčích částí disperze se významně podílí na anizotropii celkového materiálu. Podle tvaru disperze dělíme na:

- *částicové*, partikulární nebo granulární, náhodně orientované nebo orientované
- *vláknové*, disperze ve tvaru vlákna, spojitá vlákna, dlouhá vlákna, krátká vlákna (uspořádání v podélném směru, nízká ohybová tuhost)
- *deskové neboli sendvičové*, matrice s disperzí jsou navzájem prokládány, z tohoto důvodu není jednoduché určit co je matrice a co disperze



obrázek 1 Vláknová disperze [22]

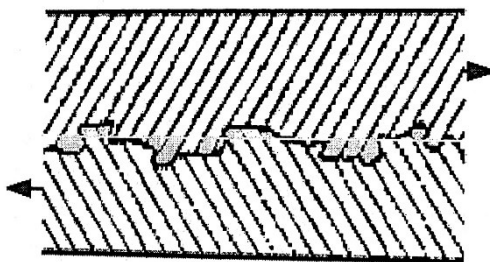


obrázek 2 Desková disperze [10]

## 1.2. Adheze v kompozitech

Adheze v kompozitním materiálu se myslí soudržnost matrice jako spojité fáze a disperze jakožto fáze nespojité. Tyto adhezní síly se zkoumají na rozhraní obou fází.

Z pravidla existují tři zdroje adhezních sil, mechanická, fyzikální a chemická. **Mechanickou adhezí** myslíme vzájemné zaklínění matrice a disperze díky přirozené drsnosti povrchu. Zaklínění je silnější, čím víc je hranice mezi matricí a disperzí drsnější.



obrázek 3 Příklad zaklínění matrice s disperzí [7]

**Fyzikální adheze** vychází z takzvané Van der Waalsovy vazby (interakce mezi molekulami), která působí na rozhraní. Tato adhezní síla významně souvisí s oboustrannou smáčivostí jak matrice, tak i disperze.

**Chemická adheze** vzniká na rozhraní tehdy, jestliže může dojít mezi matricí a disperzí k chemické vazbě. Tyto vzájemné síly jsou značně velké a to až 70 Gpa. Chemická vazba může vznikat dvěma druhy. Jedním z nich je vzájemné prolínání (difundace). Díky tomuto procesu vzniká na rozhraní tzv. difuzní mezivrstva, která má hodně silnou adhezi. Druhou možností je chemická reakce na rozhraní, kde vzniká mezivrstva chemické sloučeniny.

Adhezní síly mezi matricí a disperzí jsou velmi důležité a proto tyto charakteristiky zkoumáme různými metodami. Např. **Přímá metoda** (statické zatěžovací zkoušky), **Scratch test** (metoda vrypových zkoušek pomocí diamantového hrotu), **Odlupovací test** (kritériem je odlupovací síla) a **Vytrhávací zkouška** (jedná se o metodu, kdy jednotlivá vlákna jsou zatěžována až do míry jejich porušení). Metod pro zkoumání adhezních sil na rozhraní je celá řada, použití se liší vlastnostmi kompozitu.



### 1.3.Vlákná v kompozitním materiálu

Druhy vláken použitých pro výrobu kompozitních materiálů je celá řada, která je stále rozšiřována. Z pravidla je můžeme rozdělit takto:

- Přírodní vlákna
- Skelná vlákna
- Uhlíková vlákna
- Aramidová a silonová vlákna
- Keramická vlákna
- Kovová vlákna
- Whiskery

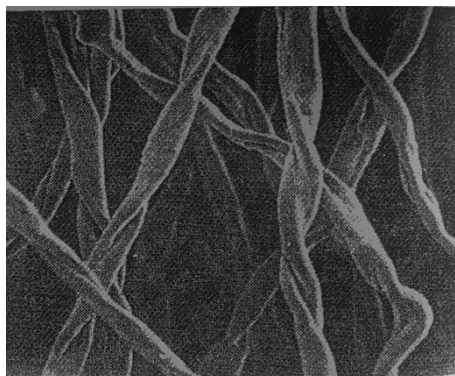
Vlákná mívají převážně kruhový průřez a mohou dosahovat různých průměrů. Podle tohoto průměru vlákna dělíme na nanovlákná (do 100 nm), mikrovlákná (0,1-1 μm), střední vlákna (1-10 μm) a hrubá vlákna (nad 10 μm).

Pro představu o jaké průměry vláken se jedná, uvedu průměr lidského vlasu – cca 0,05 μm.

**Přírodní vlákna** mohou mít nečekaně dobré vlastnosti, tato vlákna mívají poměrně složitou strukturu. Mezi přírodní vlákna řadíme lněná, jutová, bavlněná, konopná atd. Základem je vždy celulóza. Moderním směrem ve výrobě těchto vláken je získávání celulózových nanovláken pečlivým rozvlákněním dřeva. Většina naturálních vláken je biologicky odbouratelná.

Vlákno :	Hustota (g/cm <sup>3</sup> ) :	Mez pevnosti (MPa) :	Youngův modul (GPa) :	Tažnost (%) :
Konopí	1,5	460	70	1,7
Juta	1,3	440	60	2,0
Len	1,5	340	100	1,8
Bavlna	1,5	300	27	10

obrázek 4 Příklad vlastností přírodních vláken [7]



obrázek 5 Bavlněné vlákno, 300x zvětšeno, jde krásně vidět nepravidelnost jednotlivých vláken [7]

**Skelná vlákna** se nejčastěji používají v kompozitu s plastovou matricí. Tuhost těchto vláken dosahuje přibližně tuhosti hliníku. Tepelnou vodivostí jsou na poloviční hodnotě oceli a tepelná roztažnost dokonce nižší než polovina tepelné roztažnosti oceli.

**Uhlíkové a grafitové vlákno** má zhruba desetkrát větší tuhost a o polovinu menší hustotu oproti skelnému vláknu, při přetěžování se uhlíkové vlákno prodlužuje méně než skleněné. Uhlíkové vlákno si zachovává svou pevnost až do teploty 1000°C. Je elektricky vodivé a minimálně dvakrát dražší oproti skelnému vláknu. Uhlíkové vlákno se vyznačuje špatnou adhezí k matrici, z tohoto důvodu se vlákna musí povrchově upravovat pro zlepšení jejich přilnavosti.

Z důvodu orientace krystalických bloků grafitu můžeme vyrobit uhlíkové vlákno buď s vysokou pevností anebo s vysokou tuhostí. Rozdíl mezi těmito druhy znázorňuje následující tabulka:

Označení:	Použití :	Pevnost (GPa) :	Youngův modul (GPa) :	Prodloužení při přetržení (%) :
HT	Vysoká pevnost	3,1	240	1,2
HM	Vysoká tuhost	2,1	400	0,5

obrázek 6 Rozdíl uhlíkových vláken [7]

**Aramidová a silonová vlákna (polymerní)** se vyznačují malou hustotou a poměrně velkým prodloužením před přetržením. Významným představitelem této skupiny vláken je **kevlar**. Základní vlastnosti kevlarových a nylonových vláken popisuje následující tabulka:

Vlákno	Hustota (g/cm <sup>3</sup> ) :	Pevnost (GPa) :	Youngův modul (GPa) :	Prodloužení při lomu (%) :
Nylon	1,14	1,0	5,62	18
Kevlar	1,44	2,8	63,3	4
Kevlar 49	1,45	2,8	134	2,4
E sklo	2,54	3,4	72	3
Ocel	7,8	2	205	2

obrázek 7 Tabulka základních vlastností kevlarových a nylonových vláken [7]

**Keramická vlákna** se vyznačují velkou teplotní odolností a stabilitou, nízkou tepelnou roztažností a nezávislosti pevnosti na teplotě. Oproti aramidu, uhlíku a sklu vydrží vyšší tlak.

**Kovová vlákna** patří k nejlacinějšímu druhu vlákna. Jsou poměrně těžká. Vyrábějí se z bóru, wolframu, beryllia a ocele.

**Whiskery** jsou vláknité krystaly o délce 3 až 4 mm. Mají hexagonální, rovnoběžníkový popřípadě čtvercový průřez. Whiskery se vyrábí z různých materiálů (nejrozšířenější kov a keramika), bývaly drahé na výrobu, stály až tisíce dolarů za kilogram. Nové technologie výroby cenu snižují. Mezi whiskery se řadí také fosfátová mikrovlákná.

Druh	Objemová hmotnost (g cm <sup>-3</sup> )	Tahová pevnost (GPa)	Modul (GPa)	Teplotní odolnost (°C)	Průměr (μm)
keramické					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0	15	2 250	1 200	5 až 11
SiC	3,2	21	840	1 600	5 až 11
BeO	3,0	7	720	1 500	11 až 30
B <sub>4</sub> C	2,5	14	482	—	—
grafit	1,6	19	700	—	—
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,1	14	380	—	1 až 11
kovové					
Cr	7,2	9	240	—	—
Cu	8,9	3	120	—	—
Fe	7,8	13	200	—	—
Ni	9,0	4	213	—	—

obrázek 8 Vlastnosti vybraných whiskerů [5]

*Pro získání obsáhlejších informací o kompozitním materiálu doporučuji například knihu: Kompozitní materiály - Richard Bareš anebo Polymerní kompozitní materiály – Gottfried W. Ehrenstein.*

### 3 Použití a aplikace na letadle

Myšlenka aplikovat kompozitní materiály pro konstrukci v leteckém průmyslu byla již v roce 1916. Téhož roku byla podána R.Kempem patentová přihláška na konstrukci letounu složeného takřka zcela z vyztuženého plastu.

#### **Významné mezníky:**

**1940** – Trup letounu G. A. Spitfire z fenolické pryskyřice a lněného vlákna.

**1942** – První použití laminátů z nenasycené polyesterové pryskyřice zpevněné skleněnými vlákny v konstrukci letadel.

**1943** – První sendvičová kompozice v leteckém průmyslu sestavená z polyesterového laminátu a výplní z balzového dřeva.

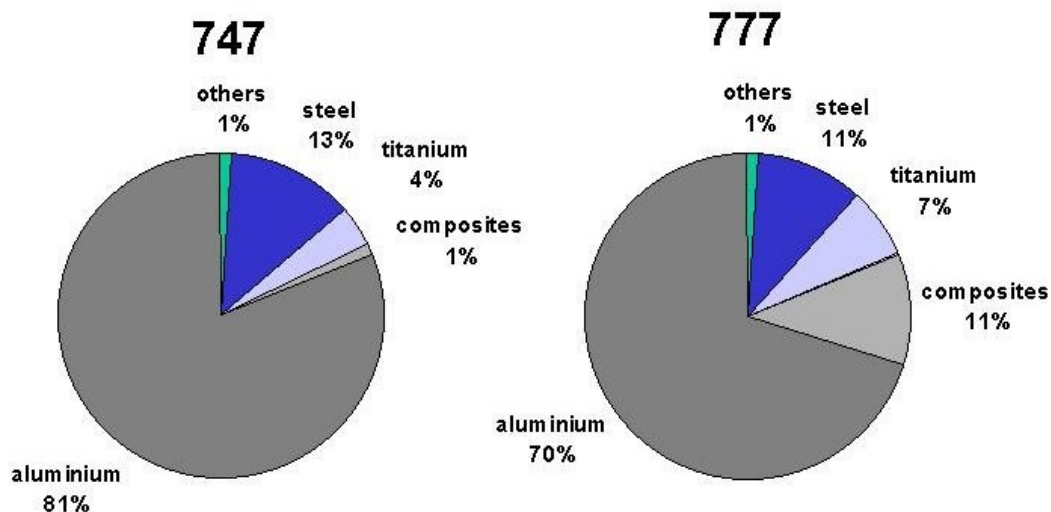
**1944** – Vznik a zdařilé letové zkoušky trupu sendvičové struktury.

**1954** – Vyvíjení prvního laminátového kluzáku v SRN.

**1967** – Letové zkoušky letadla konstruovaného ze sklolaminátu.

**1985** – Centrální část trupu a směrová kormidla Airbusu A310 – 300 z uhlíkových kompozitních materiálů.

V dnešní době se kompozitní materiál, jakožto konstrukční prvek, používá v čím dál větší míře. Tento fakt můžeme vyčíst z následujícího výšečového grafu, kde je procentem vyjádřena hmotnost daného materiálu k celkové hmotnosti letounu. Model Boeing 747 uskutečnil první let v roce 1969, zatímco Boeing 777 absolvoval svůj první let roku 1994. Nárůst kompozitního materiálu v průběhu dvaceti pěti let je podle mého názoru významný.

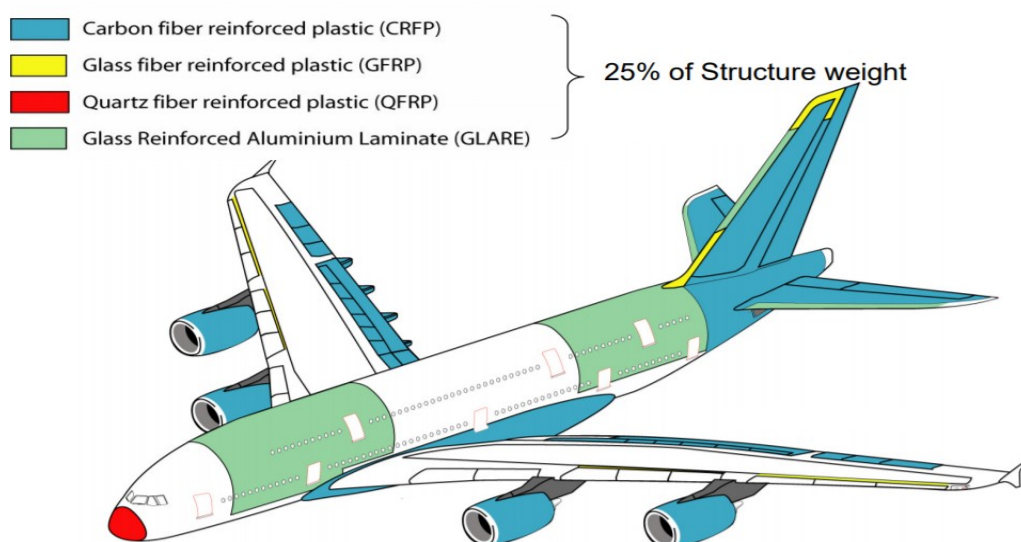


obrázek 9 Aplikace kompozitu na jednotlivých modelech. [4]

Překlad:

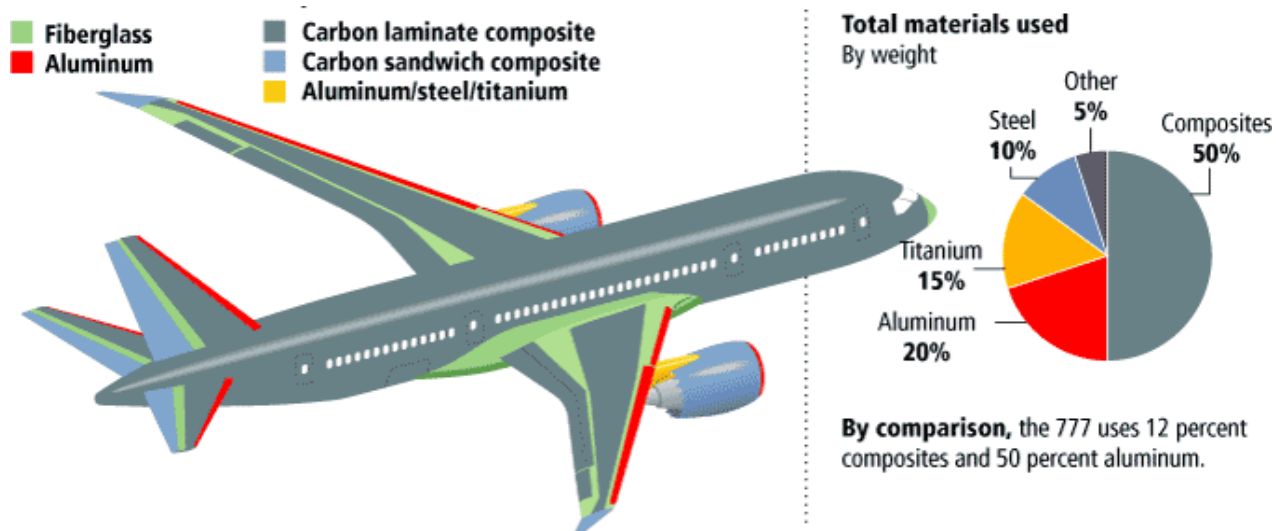
Others – Ostatní  
 Steel – Ocel  
 Titanium – Titanové slitiny  
 Composites – Kompozitní materiál  
 Aluminium – Hliníkové slitiny

Následující dva obrázky ukazují, kde, se jednotlivé druhy kompozitních materiálů uplatňují. Podíl hmotnosti se opět navýšil, a to víc než dvojnásobně.

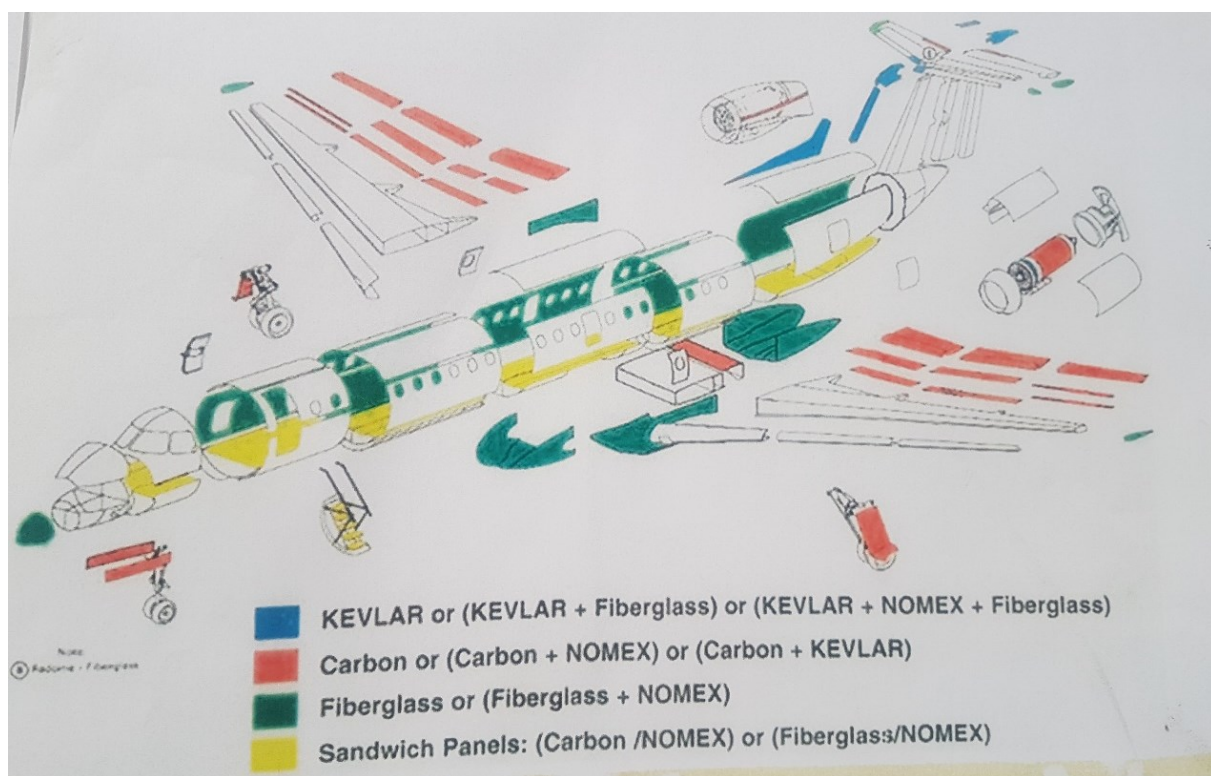


Obrázek 10 Aplikace kompozitních materiálů Airbus A380 airbus [2]





Obrázek 12 Aplikace kompozitních materiálů Boeing 787 Dreamliner [4]



Obrázek 11 Aplikace kompozitních materiálů na letoun Embraer Legacy 650

*NOMEX - je obchodní označení m - aramidových ( $m = meta$ ) vláken, vyznačující se značnou odolností vysokým teplotám. V kompozitním materiálu se často používá jako nomexová voština. Nomex nachází uplatnění při výrobě ochranných pomůcek, jako jsou rukavice, boty či ochranné oděvy.*

Použití CFRP kompozitu na letounu Airbus A320 NEO (modernizovaný A320): Spoilery, směrové kormidlo, výškové kormidlo, křídélka, klapky, panely křídel, pylony, kryty motorů, dvířka hlavního podvozku, dvířka předního podvozku, podlahové panely a jiné.

Největší zastoupení v konstrukci letounů bezpochyby zastává takzvaný vláknem vyztužený kompozit. Použití těchto vláken dovolilo sestrojít kompozit s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí. Díky těmto dosažitelným parametrům bylo kompozitním materiálům tohoto druhu věnováno značné pozornosti. Absence těchto materiálů by nedovolila posun ve vývoji, a to především v leteckém či kosmickém průmyslu.

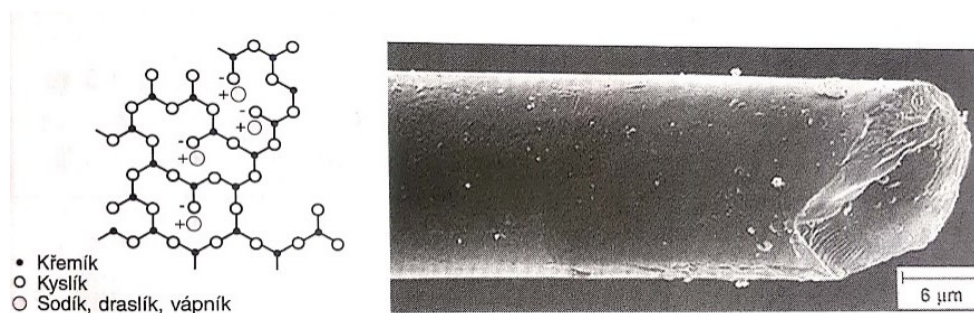
Největšího možného zpevnění vláknem vyztuženého kompozitu se docílí tehdy, jsou-li vlákna zatížena až po mez pevnosti napětím přeneseným matricí. Matrice primárně přenáší napětí do vláken. Kromě přenosu napětí na vlákna, slouží jako ochrana vláken před mechanickým poškozením a „váže“ je do vhodné / potřebné struktury. Mechanické poškození významně snižuje pevnost vláken. Vlákna jako taková představují většinu pevnosti kompozitu. Vysokou pozornost je zapotřebí klást stykové ploše (plocha mezi matricí a vlákny) a to z důvodu, že styková plocha musí zabezpečit trvalý přenos napětí z matrice do vláken. Protože vlákna v tomto druhu kompozitu mají značný význam, rozhodl jsem se jimi zabývat detailněji.

### 3.1 Skleněná vlákna - GFRP

Neboli Glass Fiber, ve zkratce jednoduše GF je jednotným názvem pro vlákna o síle  $\Phi$  3,5 až 24  $\mu\text{m}$  se souměrným kruhovým průřezem. Skleněná vlákna se většinou vyrábí rychlým tažením taveniny neboli skloviny. Rychlost tažení může dosahovat, až 400  $\frac{\text{m}}{\text{min}}$ . Podstatný vliv na zvlákňování (proces transformace tekuté látky na vlákno) má viskozita taveniny a rychlost změny vazkosti s teplotou. Obě tyto veličiny závisí na chemickém složení skla. Neméně důležitá je teplota počátku tuhnutí skloviny, tj. teplota, při které tekutá fáze s krystalickou fází může koexistovat (společně vyskytovat) v rovnováze. Z tohoto důvodu nemůžeme strukturu skla definovat pouze na základě chemického složení.

V průběhu jednoho tažení se táhne 51 až 408 vláken, z pravidla 204 vláken. Tato vlákna (či fibrily) vytváří tzv. pramenec, který je základem pro následující výrobu (provazce, tkaniny, rouna). Z důvodu vysoké vzájemné abrazivní síle, která dokáže degradovat původní pevnost vláken, musíme před vytvořením pramence jednotlivá vlákna lubrikovat. Lubrikujeme dočasně, např. škrobová lubrikace nebo trvale. Dočasná lubrikace se odstraní až po ukončení výroby výztuže a nahradí se povrchovou úpravou zaručující dobré spojení

vláken s matricí. Trvalá lubrikace zabezpečuje jak funkci ochranou, tak i úlohu vazebního činidla.



Obrázek 13 Struktura skleněného vlákna [12]

### 3.1.1 Skleněná vlákna z bez alkalické skloviny

Tato vlákna se vyznačují vynikající elektrickou izolací, ale vysokou propustností záření. Z tohoto důvodu se označují E-vlákna a sklovina jako E-sklovina. Tato sklovina je nejčastějším druhem používaným pro výrobu vláken (takřka 90%).

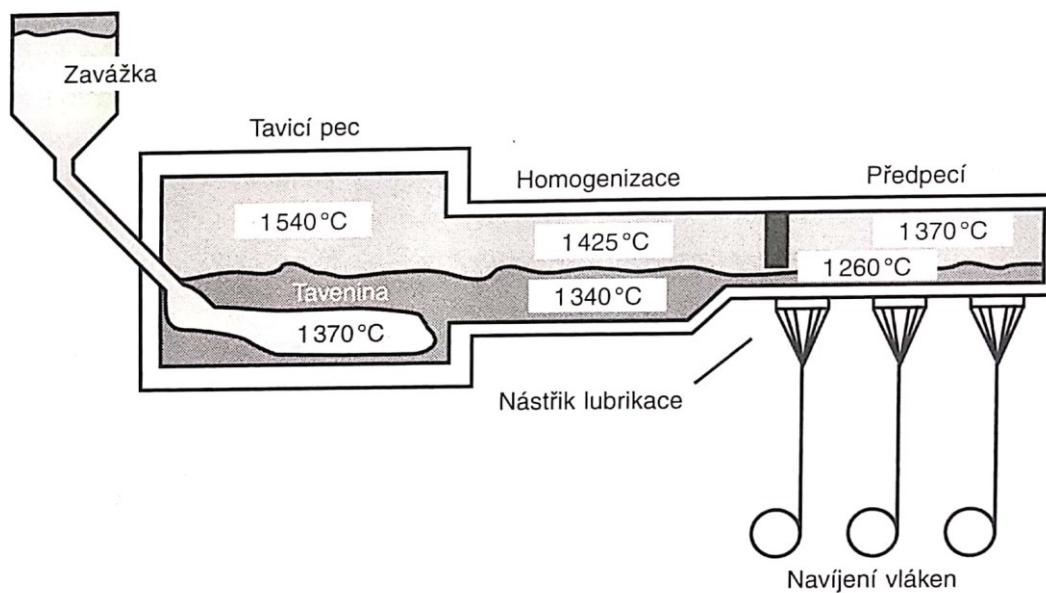
Tavenina s vyšším obsahem sloučenin  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  disponuje o 40 až 70% vyšší pevností a v USA se označuje jako S-sklovina (S od slova Strength) a v Evropě R-sklovina (R – resistance). Dále se můžeme setkat s C-taveninou, charakteristickou pro vysokou odolnost vůči kyselinám a chemicky agresivním látkám. V bezborité podobě s ještě vyšší chemickou odolností a pevností jako ECR – sklovina. Tyto bezborité skloviny disponují vyšší dielektrickou konstantou (7.0) oproti borem obsahující E-sklovinou (5.9 až 6.6). Z tohoto důvodu se vlákna vyrobená z ECR-skloviny nepoužívají například pro desky tištěných obvodů nebo v kosmickém průmyslu. Bezalkalická skleněná vlákna značená jako AR-vlákna s částečně jiným složením na rozdíl od E -vláknům, mají vysokou rezistenci proti alkáliím (zásadám). Tato vlákna se používají pro vyztužení betonu.

Díky silné kovalentní vazbě mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti taveniny, dosahujeme poměrně vysoké hodnoty pevnosti a modulu pružnosti v tahu. Na strukturu a sílu jednotlivých vazeb má vliv použitý druh oxidu kovů. Na rozdíl od vláken aramidových či uhlíkových jsou vlákna skleněná izotropní.



### 3.1.2 Popis výroby skleněných vláken

Skleněná vlákna se získávají tažením z trysek (obr. 13). Pomocí sklářské pece vyzděné žáruvzdorným jádrem se přibližně při teplotě 1400°C roztaví křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kazivec a kyselina boritá. Tavením vzniká E-sklovina, po dobu několika dní se čirí a posléze je v tekutém stavu vedena kanálky v předpeci do spřádacích trysek. Spřádací trysky vyrobené z platinové slitiny jsou předehřívány na teplotu, která umožní sklovině z 200 až 4000 trysek pomalu vytékat a rychle tuhnout do tvaru vláken. Vlákna na výstupu z trysky jsou cca 2 mm silná. Až dloužením vysoce vazkých vláken na velice rychle rotujícím navíjecím zařízení se vlákna kalibrují na požadovaný průměr. Současně se vlákna prodlužují až na 40000krát větší délku. Odtahová rychlost vláken může dosahovat  $50 \frac{m}{s}$ . Teprve sdružením těchto takřka neviditelných vláken vznikne ohebné přádací vlákno.



Obrázek 14 Schéma výroby textilních skleněných vláken tažením z trysek [12]

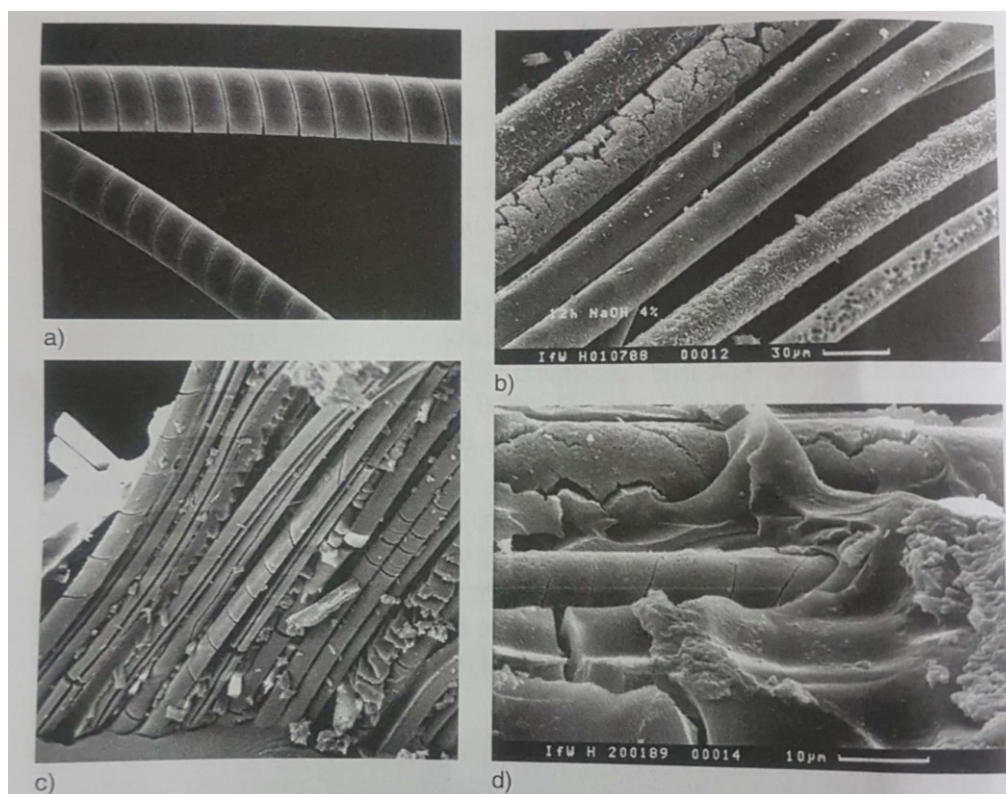
Během výroby skleněných vláken se v průběhu tažení aplikuje na nově vyrobená vlákna již zmíněná lubrikace. Tato tzv. šlichta je vodní emulzí. Úkolem tohoto smáčení je:

- Sdružit jednotlivá vlákna do požadovaného spřádacího vlákna
- Zamezit poškození povrchu křehkého vlákna
- Uzpůsobit jednotlivá vlákna k dalšímu zpracování
- Posílit vazbu mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem

Lubrikaci tvoří převážně čtyři, primární důležité složky:

- Vinylacetáty polymerizované do daného stupně popřípadě polyestery a jiné pryskyřice => **filmotvorná lubrikace** – chrání a spojuje elementární vlákna do pramenů.
- **Antistatika** – anorganická sůl, slouží pro odvod elektrostatického náboje.
- **Maziva** – umožňují produktu, ale i vláknům získat potřebné kluzné vlastnosti.

Lubrikace je důležitým procesem při výrobě vláken. Protože slabým místem těchto kompozitů je fázové rozhraní (vlákno – matrice). Podél tohoto rozhraní může kapilárním působením pronikat chemikálie a tím způsobovat korozi. Mimo lubrikace je prevencí proti tomuto jevu silnější vrstva pojiva na povrchu laminátu.



Obrázek 15 Koroze E-vlákna a/b - koroze bez namáhání, c/d koroze s ohybovým namáháním. - [12]

Samostatná vyztužující vlákna se uplatňují jen výjimečně. Pro lepší zpracovatelnost se používají již upravené produkty z těchto vláken (roving, příze, krátká vlákna, tkaniny atd.).

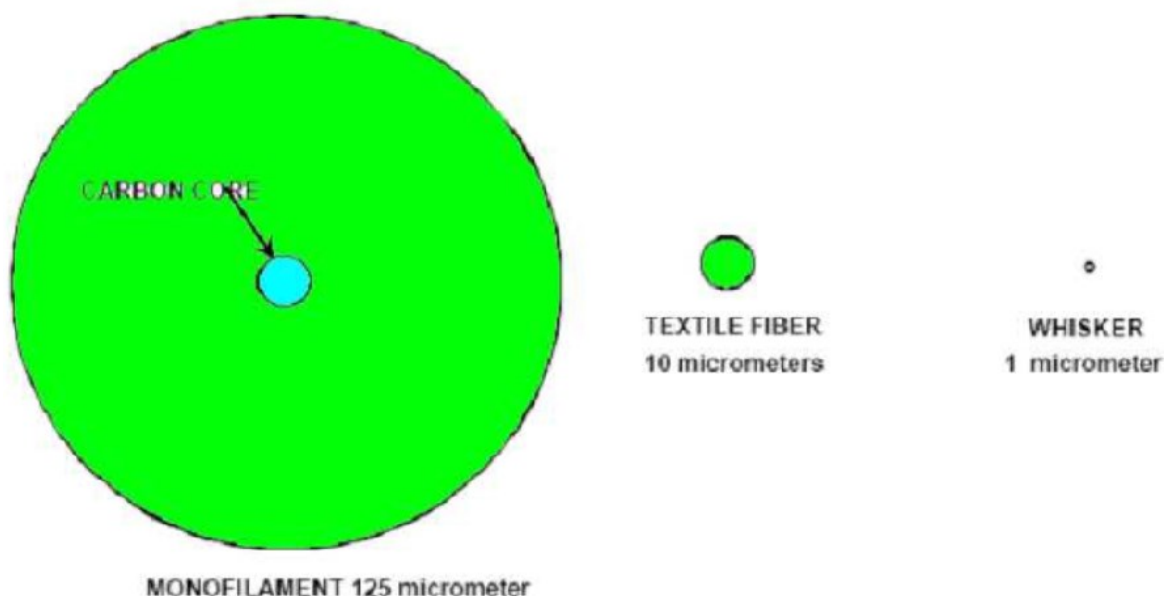
Dalším zpracováním vláken je vazba, existuje mnoho typů těchto vazeb (atlasová, plátňová atd.), každá z nich disponuje jinou charakteristikou a uplatněním.

### 3.2 Křemíková vlákna QFRP

Křemíková vlákna se vyrábí z karbidu křemíku (SiC). Proto můžeme v různých literaturách narazit na označení SiC fiber reinforced composites. Možností výroby karbidu křemíku je více, ale pro použití v leteckém nebo kosmickém průmyslu se aplikuje metoda CVD (Chemical Vapor Deposition). Touto metodou vyrobená vlákna se používají výhradně s uhlíkovými, kovovými (MMC) nebo keramickými (CMC) matricemi. Výhodou těchto vláken je vysoká teplotní odolnost a zároveň nižší tepelná roztažnost oproti superslitinám, nízká hustota, vysoká pevnost, chemická rezistence. Oproti uhlíku a aramidu snáší větší tlak.

Těmito vlákny vyztužený kompozit najde uplatnění tam, kde dochází k vysokému tepelnému namáhání. Například spalovací a turbínové komponenty (plášť vysokotlaké turbíny motoru CFM LEAP) proudových motorů, výměníky tepla nebo výfukové vedení. Pro zajímavost, vlákna z karbidu křemíku odolávají při teplotním zatížení oxidačním plamenem o teplotě cca 1200°C zhruba tisíckrát více než vlákna uhlíková.

Karbid křemíku je používán také jako whisker. Mezi keramickými i kovovými whiskery dosahuje nejvyšší tahové pevnosti (21 Gpa) a tepelné odolnosti (1600°C a víc).



Obrázek 16 Rozdíl velikostí druhů křemíkových vláken. – [6]

Jak lze vidět na obrázku číslo 16, uhlíkové vlákno figuruje v tomto případě jako jádro, na které je nanášen metodou CVD karbid křemíku.

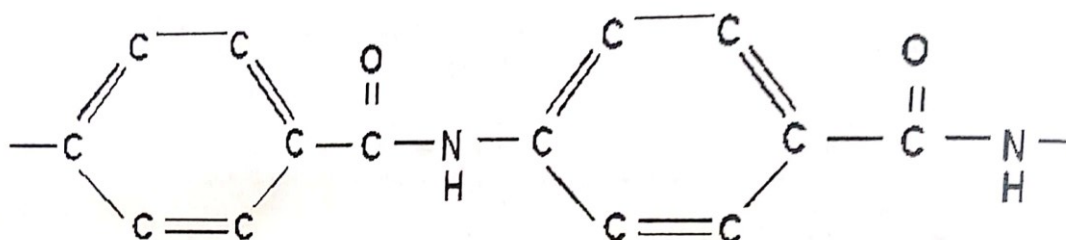
### 3.3 Polymerní vlákna

Z důvodu určitých vlastností přírodních vláken jako je vysoká citlivost vodě, která značně ovlivňuje pevnost i modul pružnosti anebo biologické korozi, bylo nutné vytvořit vlákna na syntetické bázi.

V běžné praxi se můžeme setkat s vlákny z polyamidu (silon, nylon). Tato vlákna se v produkci kompozitu moc neosvědčila z důvodu nízkého modulu pružnosti 1 – 3 GPa, který předčí i celulosové vlákno (10 GPa). Tato skutečnost zavedla výrobu polymerních vláken z vysoce orientovaného aromatického polyamidu (PPT). Nedostatkem polymerních vláken je citlivost k vyšším teplotám. Polyamidy ztrácí téměř celou svou pevnost již pod hranicí 100°C. Aramid odolává lépe, dokáže být zcela stabilní až do teploty 150°C, ale s navyšující se teplotou postupně ztrácí svou pevnost (při 250°C po dobu 8 hodin činí ztráta 30% pevnosti). V kompozitní podobě se odolnost vůči teplotě navyšuje. Rozkladu aramidu dosáhneme při teplotě cca 480°C. Některá vlákna dokážou krátkodobě odolávat teplotám až 1000°C (Kynol) nebo téměř 2500°C (Kaisol). Stejně jako vlákna uhlíková, mají aramidová vlákna záporný součinitel tepelné roztažnosti.

#### 3.3.1 Aramidová vlákna (AF)

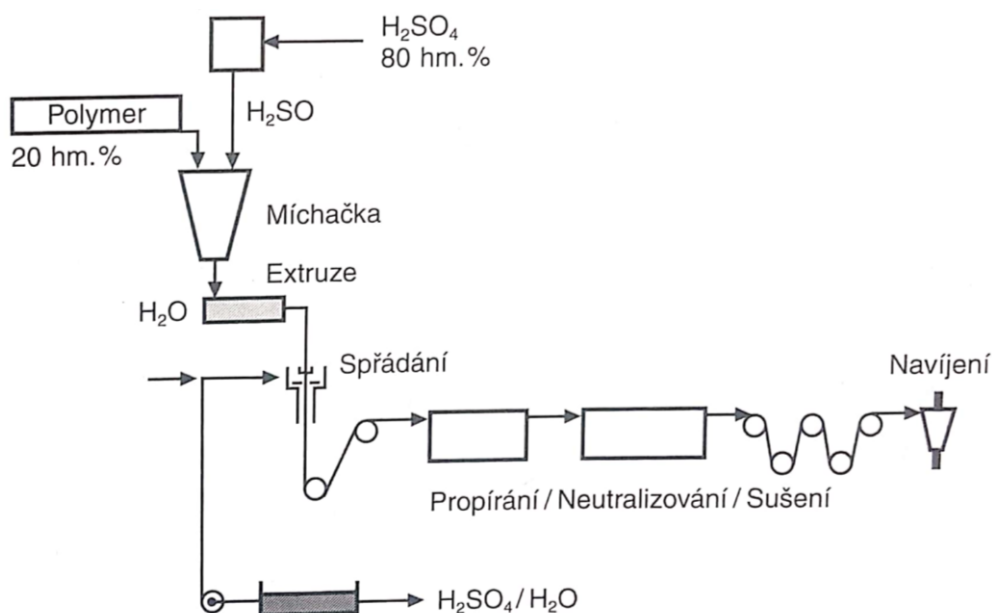
Jsou vlákna založená na základě lineárních organických polymerů. Pro širší veřejnost je známějším názvem Kevlar. Objev těchto vláken (Kevlaru) roku 1961, připisujeme pracovníci výzkumu firmy DuPont Stephanie Kwolekové. Toto pojmenování je obchodní označení firmy DuPont. Hlavními výhodami tohoto druhu je vysoká pevnost, tuhost a slušná teplotní odolnost. Tyto vlastnosti umožnily aplikaci aramidových vláken v různých odvětvích (balistika, ochranné oděvy, telekomunikace atd.).



Obrázek 17 Makromolekula kevlaru [7]

## Výroba aramidových vláken

Výroba těchto vláken metodou spřádání taveniny není možná, protože teplota tavení je vyšší než teplota tepelného rozkladu samotného materiálu. Krystalická vlákna získáváme z 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové. Elementární vlákna jsou spojována, čištěna a opatřena aviváží (pro usnadnění zpracovatelnosti). Lubrikace vláken nemusí být vždy vhodná, může zapříčinit změkčující účinek. V některých případech musíme delubrikovat v organických rozpouštědlech. Adheze kevlarových vláken je z pravidla nižší oproti jiným vláknům.



Obrázek 18 Schéma výroby aramidových vláken [12]

Kevlarová vlákna můžeme kombinovat s reaktivními pryskyřicemi a termoplasty. Protože vlákna jsou hydrofilní (pohlcují vlhkost), musíme je před použitím patřičně vysušit. Vlhkost v nich obsažená, negativně ovlivňuje pevnost spojení na rozhraní, ale i pevnost samotného vlákna. Při laminování můžeme využívat téměř 70 % pevnosti vláken, a při použití speciálních tažných matric tuto využitelnost navyšujeme. Pro navýšení hodnot mechanických vlastností, aplikujeme proces dloužení. Tento proces spočívá v usměrňování řetězce molekul do polohy paralelně s osou vlákna, díky tomuto navyšujeme soudržnost jednotlivých molekul ale i pevnost samotného vlákna. Bohužel to vše na úkor tažnosti. Čím vyšší modul pružnosti vlákno má, tím nižší je jeho tažnost, a naopak. Takto vyrobené

elementární vlákno je kruhového průřezu o průměru 12  $\mu\text{m}$  s lehce zdrsňeným povrchem. Aramidové vlákno je silně anizotropní, mez pevnosti v tahu je značně vyšší než mez pevnosti v tlaku. Z tohoto důvodu jsou aramidovým vláknem vyztužené kompozity vhodné pro konstrukci zatíženou převážně tahem, protože při namáhání ohybem nebo již zmíněným tlakem nedokáže vzdorovat stejnými hodnotami. Nevýhodou aramidových kompozitu je špatná obrobitelnost.

Kevlarová vlákna nemůžeme vystavovat vysoko energetickému záření (například UV záření), tato záření významně snižují pevnost vláken.

Vlákno	Hustota ( $\text{g/cm}^3$ ) :	Pevnost (GPa) :	Youngův modul (GPa) :	Prodloužení při lomu (%) :
Nylon	1,14	1,0	5,62	18
Kevlar	1,44	2,8	63,3	4
Kevlar 49	1,45	2,8	134	2,4
E sklo	2,54	3,4	72	3
Ocel	7,8	2	205	2

Obrázek 19 Mechanické vlastnosti jednotlivých vláken [7]

### 3.4 Uhlíková vlákna (Carbon Fiber)

Uhlíková vlákna patří k nejmodernějším vláknům. Jako první aplikaci uhlíkových vláken můžeme označit žárovková vlákna, která vyráběl Thomas Alva Edison. Vyráběla se karbonizací bavlněných nití popřípadě bambusových vláken.

Vlákna, vyráběná syntetickou cestou, se poprvé začala vyrábět v průběhu 50. let minulého století. Byla vyráběna z rayonu (syntetické hedvábí). Tato vlákna našla uplatnění ve výrobě látek nebo jako tepelný izolant, bohužel nedosahovala významných mechanických vlastností. První mechanicky význačná vlákna byla zhotovena v roce 1959 společností Union Carbide v USA. Tímto objevem firma ukázala možný potenciál uhlíkových vláken. Až v průběhu 70. let 20. století, se tato vlákna představila jako primárně zesilující materiál kompozitů s nepřehlednými vlastnostmi. V téže roku se tyto kompozity uplatnily ve výrobě v oblasti kosmického průmyslu.

#### Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna nelze vyrábět stejným způsobem jako vlákna skleněná nebo polymerní. Tato skutečnost je způsobena tím, že uhlík nelze přivést k bodu tání. Není tažný. Tak jako



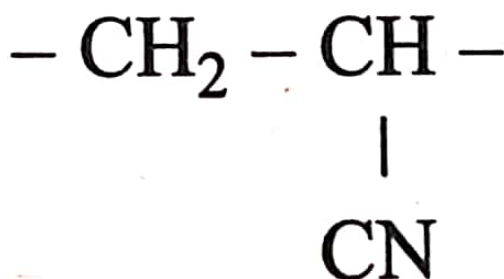
jiné uhlíkové materiály, získáváme uhlíková vlákna procesem kontrolované pyrolýzy (rozkladem) organických prekurzorů (výchozí materiál). Prekurzor jako takový, musí být ve formě vláken, je tvořen umělými polymery – polyakrylonitril (PAN) anebo z přírodních polymerů (tkaním smoly). Tato metoda získávání uhlíkových vláken je v dnešní době nejčastěji používaná. Následná karbonizace za vysokých teplot, uchovává prekurzoru výchozí tvar. Použitá teplota při grafítizaci ovlivňuje budoucí vlastnosti vláken. Tento postup dovolí utvořit jak vlákna, tak i plsti nebo textilie z nich vyrobené. Vlákná se navíjejí na cívky, v několika set metrech, každý svazek obsahuje 1000 – 10 000 vláken (filamentů). Průměr svazku bývá v rozmezí 5 až 12 μm. Vlákná vyrobená z polyakrylonitrilu (PAN) jsou považována za standartní vlákna. Izotropní vlákna připravovaná tažením smoly dosahují vysoké hodnoty pružnosti v tahu, zatímco pevnost v tlaku je oproti standartnímu vláknu významně nižší. Vysoce modulová vlákna (HM) a vysoce pevnostní vlákna (HT) se vyrábějí pro speciální účely.

Druhou metodou přípravy uhlíkových vláken, je tepelný rozklad uhlovodíků CVD nebo PVD technologií. Při této výrobě, je možné získat i nanovlákná.

Uhlíkové whiskery se vyrábí metodou odpařování z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami v přetlakované atmosféře argonu.

### 3.4.1 Vlákná typu PAN

Vlákná vyrobená z polyakrylonitrilu patří k nejčastěji produkovaným uhlíkovým vláknům. Tento druh dokáže poskytnout široký rozsah vlastností. Jako základní prekurzorové vlákno může být použito textilní akrylátové vlákno (ORLON). Ovšem častější aplikací je prekurzor ze speciálně vyrobeného polymeru (kopolymer) s opakující se chemickou vazbou. Pro získání nejvyšších možných hodnot pevnosti a E – modulu paralelně s osou vlákna, je zapotřebí uspořádat silně vázané atomy uhlíku podél téže osy. Tento problém nastává v celém průběhu výroby.



Obrázek 20 Příklad opakujícího se polymeru [14]

Celý proces výroby začíná **spřádáním**. Polymer se protlačuje skrze trysku, která obsahuje tisíce otvorů o velikosti desetin milimetrů. Vlákná následně putují do srážecí lázně nebo do náporu studeného vzduchu. Obě tyto metody mají za úkol odstranit rozpouštědlo. V atmosféře vodní páry probíhá tzv. **vytahování**. Díky této operaci se docílí nejvyšší možné orientace lamel, vůči ose vláken. K tomu, aby prekurzor dosáhl teplotně stabilního uspořádání, stal se tedy netavitelným, musíme zavést proces zvaný **rektikulace**. Rektikulace dovolí vlákno karbonizovat a vytěžit dostatek uhlíku. Tento děj probíhá v atmosféře vzduchu při teplotách 200 až 300°C. Velmi důležitá je kontrola teploty, kdyby došlo k přehřátí, mohlo by nastat slepení vláken, popřípadě rozpadu polymerních řetězců. Rektikulace probíhá přibližně dvě hodiny. Takto zpracované vlákno již odolává přímému ohni a je teplotně stabilní. Podobá se textilnímu vláknu černé barvy, už v tuto chvíli může nahradit karcinogenní azbest.

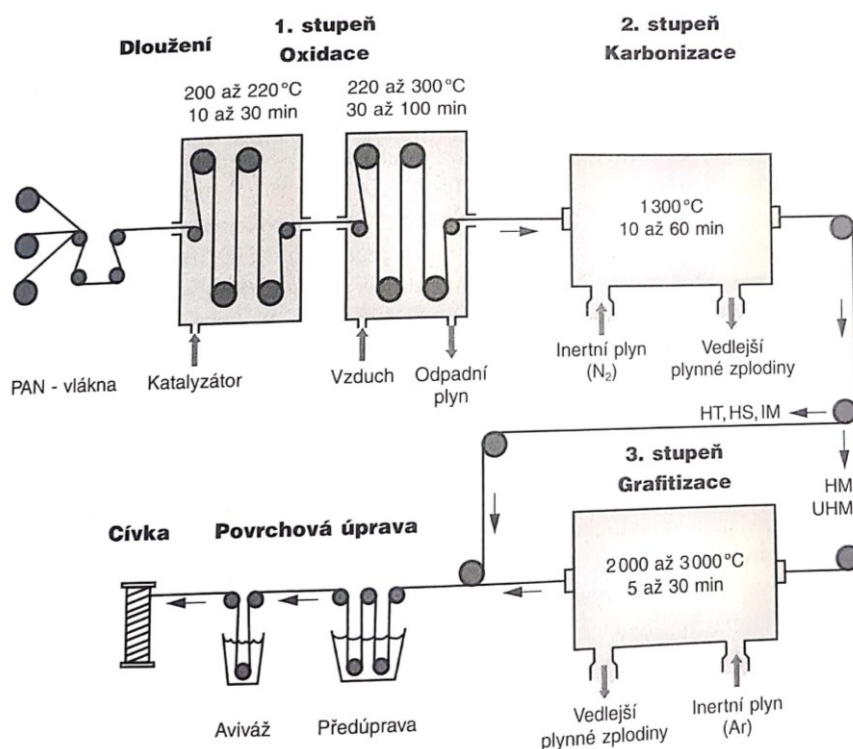
### **Karbonizace**

Ustálená vlákna pomocí rektikulace jsou pyrolyzovaná v neutrální atmosféře dusíku. Během tohoto děje nastane cyklizace a kondenzace. Vzniklé prvky jako jsou vodík, dusík a kyslík se postupně odstraní. Toto odstranění zapříčiní úbytek cca 50% hmotnosti oproti prekurzoru. Vzniklé prchavé látky obsažené v kolujícím dusíku jsou jedovaté. Tyto látky odstraní katalytické spalování anebo proplachování. Karbonizace vláken se odehrává při teplotách 1100 až 1400 °C. Teplota 1400 °C je limitní, navyšování teploty nad tuto hodnotu již odolnost vláken nenavýší.

### **Grafitace**

Karbonizací se docílí pouze 93 % obsahu uhlíku. Pro získání 100 % uhlíku obsaženého, se provádí grafitace. Grafitace provádíme teplotami nad 2500 °C pomocí indukčních pecí v inertní atmosféře (dusík, argon). Ve vláknech se začnou objevovat grafenové vrstvy téměř s paralelním uspořádáním s osou vlákna, které je nedokonalé. Grafitace má převážně za úkol zlepšit uspořádání a zvětšit grafenové vrstvy. Cílem této operace je navýšení Youngova modulu.





Obrázek 21 Schéma výroby PAN vláken. [12]

Fáze	Probíhající procesy	Složení [%]			
		C	H	N	O
spřádání	protahování a vyrovnávání řetězců PAN	68	6	26	
retikulace	dehydrogenace fixace kyslíku tvorba můstků mezi řetězci	65	5	22	8
karbonizace > 1 100 °C	cyklizace s eliminací O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> s výjimkou části reziduál. atomů N <sub>2</sub>	93	1	6	
vysokoteplotní opracování > 2 500 °C	eliminace posledních heteroatomů nárůst orientace a velikosti polyaromatických krystalitů	100			

Obrázek 22 Obsah prvků v jednotlivých krocích [14]

## Úprava povrchu

Úprava povrchu je posledním krokem před použitím uhlíkových vláken. Realizuje se kontrolovanou oxidací v plynném (CO<sub>2</sub>) nebo kapalném (oxidační směs) prostředí. Účelem této úpravy je navýšení adheze na rozhraní. Adheze může vzrůst až čtyřnásobně. Pro snazší

manipulaci a ochranu povrchu vlákna se nezřídka aplikuje tenký povlak polymeru stejného složení, jako budoucí matrice.

### 3.4.2 Vláknna na základě smoly (mezofáze)

Pro výrobu těchto vláken, je zapotřebí použít vstupní surovinu s vysokým obsahem uhlíku. Často užívané vstupní suroviny jsou černouhelné nebo ropné smoly izotropních vlastností, získávané destilací ropného nebo černouhelného dehtu. Dalším typem prekurzoru je extrakt z rozpouštěného černého uhlí. Prekurzory se můžou aditivovat nebo upravovat pro dosažení požadovaných vlastností. V případě přípravy těchto vláken bez speciálních opatření, pouze spřádáním roztavené smoly s následnými potřebnými kroky jako je stabilizace, oxidace a koksování vzniknou izotropní vlákna. Lze také vyrobit vlákna anizotropních vlastností a to pomocí hydrodynamických jevů.

Vstupní surovina se zahřívá a udržuje na teplotě více než 350 °C. V tuto probíhá mezofáze. Mezofáze obsahuje aromatické molekuly o značné molekulové hmotnosti, seřazených v souvislých vrstvách. Vzniklá mezofáze je doopravdovým kapalným krystalem se silně anizotropní charakteristikou. V průběhu stabilizace a karbonizace na hranici 2000 °C nastává transformace na uhlík. Při této přeměně je možné vylepšit orientaci molekul. V posledním kroku výroby, se provádí žíhání teplotami až 3000 °C. Nastanou transformace podobné rekrytalizaci, které se můžou zintenzivnit dloužením. Takto vyrobená vlákna mohou dosahovat vysokých hodnot modulu pružnosti. Bohužel nepředčí hodnoty E-modulu vláken vyrobených z PAN. Vláknna produkovaná z mezofázových smol dosahují vyšší tuhosti oproti vláknům PAN, ale za to nižší odolnosti. Další nevýhodou je horší slučitelnost s některými druhy pryskyřic.

Při výrobě vláken ze smol dosahujeme vyšší hmotnostní výtěžnosti (80 %), oproti vláknům typu PAN (55 %). I přes tento rozdíl jsou vlákna ze smolného prekurzoru dražší a složitější na výrobu.

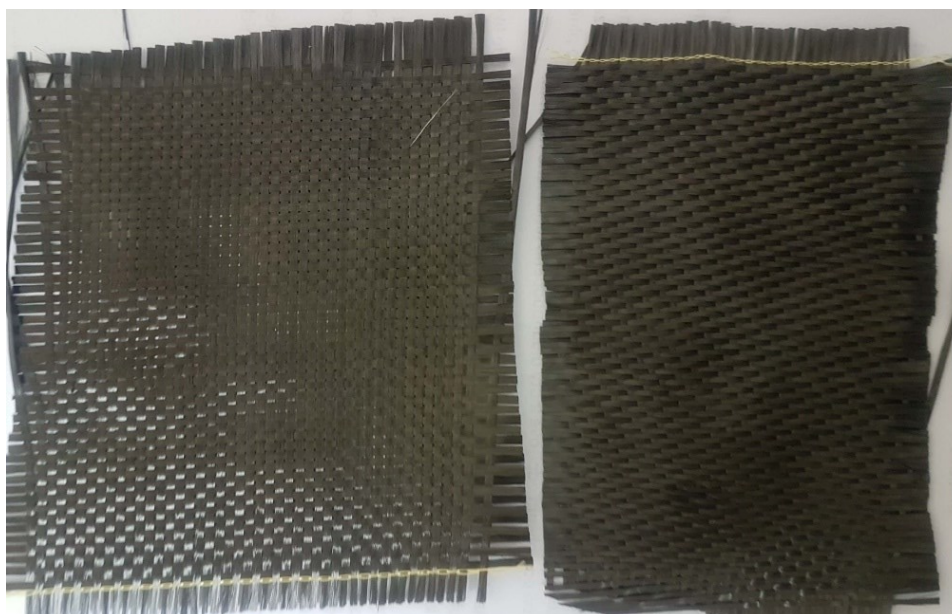
Složitost výroby se projevuje při spřádání, kdy roztavený prekurzor (smola), je vytlačován skrze trysku složenou z kapilárních kanálků. Už během průchodu kanálky, začíná smola chladnout a v konkrétní vzdálenosti od trysky, se prekurzor utvoří ve vlákno. Problém spočívá ve chvíli, kdy mezofázová smola může při spřádání ještě „pracovat“, tím může ovlivnit rezistenci proti protržení a vazkost tvořených vláken. Tyto parametry se prudce mění s teplotou. Tento problém umocňuje rychlost výstupu filamentů, dosahující několika set metrů za minutu.

### 3.4.3 Charakteristika vláken vysokých parametrů

Vlákna vysokých parametrů jsou vyráběna pro následnou výrobu kompozitních materiálů. Je to v podstatě jediné možné použití těchto vláken. Mimo svou odolnost v tahu a tuhost, propůjčují kompozitním materiálům značnou rezistenci proti únavě, ale i schopnost tlumit vibrace a zvuk. Dalšími typickými vlastnostmi uhlíkových vláken vysokých parametrů jsou mimo jiné - odolnost vůči korozi, malá roztažnost nebo žáruvzdornost. Uhlíková vlákna mohou být použita i do kompozitů typu CLC – *carbon laminate composite*, tedy „zalitá“ v pryskyřici. Pevnostní charakteristika uhlíkových vláken při namáhání vysokými teplotami je téměř lineárně rostoucí s teplotou a to do cca 3500 - 4000 °C, po překročení této teploty, se pevnost značně snižuje.

V kompozitech, mají vysoká vlákna augmentativní charakter, zajišťují pevnost a tuhost výsledného materiálu. Matrice, jak již bylo zmíněno v první kapitole, distribuuje napětí mezi vlákna a zachovává požadovaný tvar kompozitu. Spojování a volba vláken je realizováno na základě požadovaných výstupních parametrů, tak aby tvořila zesilující strukturu a docílila kýžených hodnot pevnosti a tuhosti.

Mezi nejčastěji aplikované způsoby tkaní uhlíkových vláken je Plain Weave (Prosté tkaní) anebo Harness Satin (volně přeloženo jako saténové tkaní). Toto „saténové“ tkaní se rozlišuje podle počtu přízí.



Obrázek 23 Nalevo metoda Plain weave, napravo metoda Harness satin.

### 3.4.4 Vlákn – pryskyřice

Při aplikaci 1D nebo 2D uspořádání vláken je nejčastěji používáný prepreg („polotovár“). Prepreg se vyrábí napuštěním zpevňující struktury pryskyřicí, která poté vytvoří konečnou matici. Prepregy obvykle dosahují šířky 300 mm, jestliže jsou 1D vyztužené a šířku 1 popřípadě 1,2 m, tehdy když jsou vyrobeny z textilií, tloušťka těchto výtuzí se pohybuje v rozmezí 1 až 3mm. Šířka ovšem může dosahovat jiných rozměrů, v závislosti na budoucí aplikaci vyrobeného materiálu. Obsah napuštěné pryskyřice činí řádově 35 %. Distribuují se ve tvaru role.

Nejčastěji používanou pryskyřicí je epoxidová pryskyřice, která se vyznačuje výbornou adhezí. Charakterizují se nízkým smrštěním v průběhu vytvrzování a vynikající odolností. Jestliže je zapotřebí kompozit pro užití za teplot přes 200 °C, používá se polyimidová pryskyřice.

### 3.4.5 Aplikace uhlíkových kompozitů na letadle

Jak v leteckém, tak i v kosmickém průmyslu je aplikace těchto kompozitů velmi významná. Pevnost vůči roztržení, vysoká tuhost, nízký sklon k únavě či korozivzdornost jsou u těchto kompozitů několikrát větší než u oceli nebo slitin hliníku, přičemž hmotnost může dosahovat až pětikrát menších hodnot. Tyto přednosti jsou bezesporu pro letecký nebo kosmický průmysl významné.

Kompozity uhlíkové vlákno – pryskyřice se uplatňují jako strukturální součásti jak pro civilní leteckou dopravu, tak i pro vojenskou leteckou techniku.

Například **Airbus A320** používá tento typ pro konstrukci směrového kormidla. Uplatnění tohoto kompozitu neustále roste (např. A350 nebo B787), proto můžeme očekávat významný posun ve vývoji tohoto netradičního konstrukčního materiálu.

#### **Shrnutí vlastností uhlíkových vláken:**

Pozitiva:

- S narůstajícím zatížením narůstá Youngův modul pružnosti.
- Vysoká pevnost.
- Korozní odolnost.
- Dobrá tepelná a elektrická vodivost.
- Výborné tepelné charakteristiky.

Negativa:

- Nízká odolnost při ostrém ohybu.
- Poměrně vysoká cena oproti jiným vláknům.

## 4 Vyhledávání a diagnostika závad kompozitu typu CRFP

V první řadě je potřeba si uvědomit, jaké poškození může na jednotlivém kompozitním materiálu nastat a jakým způsobem jej lze odhalit. Ve vyhledávání různých typů poškození se uplatňují především metody nedestruktivního zkoušení (např. ultrazvuk, termografie atd.). Nedestruktivní zkoušení (NDT) slouží k zjištění stavu struktury kompozitu, aniž by došlo k jeho poškození nebo znehodnocení.

**Defektoskopie** neboli NDT (Non-Destructive Testing), je proces zjišťování kvality a stavu materiálů, kontrolovaných součástí, konstrukčních částí, případně celých sestav. Při NDT kontrole je vyhledávána nespojitost nebo rozdíly ve struktuře materiálu bez rizika jakéhokoliv poškození, či provozu zneschopnění zkoušené součásti. Po dokončení kontroly bez nálezů poškození, které by mohlo bránit dalšímu použití, je možné zkoušený prvek ihned uvolnit do provozu. Nedestruktivní zkoušení je dnes nedílnou součástí procesů zkoušení a kontrol většiny materiálů napříč všemi průmysly. Uplatňuje se při výrobě, a to pro zajištění integrity, spolehlivosti výrobků, kontroly výrobních procesů a hlavně k udržení jednotné úrovně kvality

Výhody NDT: Lze zjistit aktuální stav, aniž by došlo k poškození součásti, není vždy potřebné demontovat jednotlivé součásti (úspora času), poměrně rychlé provedení, dovolí provést prohlídku tam, kde konvenční metody zkoušení nedají patřičný výsledek. NDT zkoušení může provádět pouze řádně proškolená a certifikovaná osoba.

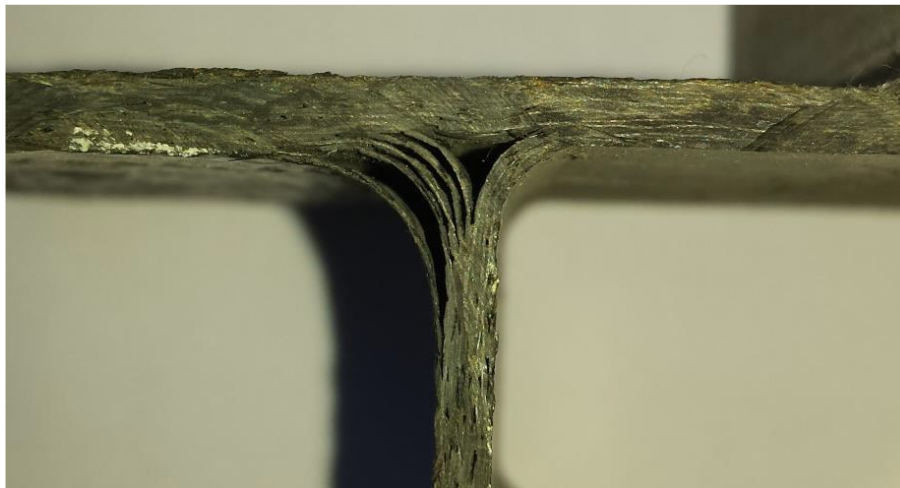
Mezi základní metody NDT se řadí:

- Vizuální zkoušení (VT)
- Kapilární zkoušení (PT)
- Magnetická prášková metoda (MT)
- Metoda vířivých proudů (ET)
- Ultrazvukové zkoušení (UT)
- Prozařování (RT)

### 4.1.1 Vady kompozitů

Vad v kompozitních materiálech je celá řada. Nejčastější vady v kompozitech jsou delaminace a porozita.

**Delaminace neboli odlepování,** je nespojení dílčích vrstev mezi sebou. Může vzniknout špatnou výrobou, při obrábění anebo při nepozorné manipulaci. Delaminace je vadou v mnoha případech nepřipustnou, ale nastávají situace, kdy může být v určitém rozsahu tolerována.



*Obrázek 24 Příklad delaminace v okolí rádiusu [1]*

**Porozita** je náhodný vznik plyných bublinek, které mohou vznikat v průběhu výroby, při ukládání vrstev. Rozsáhlá porozita může způsobit nesoudržnost mezi dílčími vrstvami kompozitu. Pro zabránění vzniku těchto bublinek se používá odplynování každé vrstvy ve vakuu. Při použití prepregů se odplyňuje po několika vrstvách najednou.



*Obrázek 25 Příklad porozity v kompozitu [1]*

Nejnáchylnějším místem z pohledu vzniku delaminačních vad jsou místa kolem ohybů. Obrábění (vrtání děr, frézování), je také značným rizikem vzniku delaminace.

Vyhledávání těchto strukturálních vad na uhlíkových kompozitech (CFRP) je zpravidla prováděno pomocí ultrazvukové metody. Kontrola kompozitních materiálů vyztužených



jinými vlákny je víceméně podobná. Jenom je zapotřebí použít odlišnou techniku. Například při testování kompozitu vyztuženého skleněným vláknem (GFRP) se také používá ultrazvuková metoda, ale aplikuje se průchodová technika (sonda umístěná z obou stran), protože skleněné vlákno výrazně tlumí ultrazvukové vlnění.

Typy Vad:

Výrobní vady - v samotné výrobě (laminace), obrábění a manipulací, skladování (vlhkost).

Provozní vady - mechanické namáhání, povětrnostní podmínky, tepelné poškození.

Častou vadou, vyskytující se převážně v provozu, je krystalická koroze. Tato koroze vzniká vzájemnou reakcí vyztužujících vláken se slitinami hliníku. Nejintenzivnější reakce vznikají s uhlíkovými vlákny. Pro zabránění vzniku této koroze, je zapotřebí použít slitin z ušlechtilých kovů (např. titanové slitiny).



*Obrázek 26 Příklad mezi krystalické koroze hliníkového plechu s kompozitem vyztuženým skelnými vlákny*

Podrobněji budu popisovat metody, které se používají výhradně ke zkoušení CFRP kompozitů.

## 4.2 Vizualní kontrola (VT)

Nejjednodušší NDT kontrolou je tzv. vizualní kontrola. Tato metoda je v údržbě letadel základní kontrolou, měla by předcházet každou jinou nedestruktivní metodu. S její pomocí se mimo jiné odhaluje zjevné poškození struktury povrchu, jako jsou praskliny, promáčkliny, vrypy a jiné, za pomoci zraku nebo zraku s pomocí optických či porovnávacích pomůcek. (endoskop, lupa, zrcátko aj.) I tato zdánlivě jednoduchá metoda, nevyžadující vysokou odbornou způsobilost personálu, má svá úskalí. I v tomto případě musí technik provádějící kontrolu dodržovat stanovené postupy, které uvádějí letecké přepisy nebo samotný výrobce letadla. Zpravidla všechny tyto postupy pocházejí z normy ČSN EN 13018 nebo MSG-3, která jednotlivá nařízení a postupy stanovuje.

U všech vizualních kontrol je nutné respektovat a dodržovat zásady „Lidských činitelů“.

Vizualní prohlídku rozdělujeme na kontrolu:

- Přímou.
- Nepřímou

V údržbovém manuálu letadla (AMM) se zpravidla potkáme se zkratkami GVI (General Visual Inspection), DET (Detailed) a SDI (Special Detailed), jedná se o jiné pojmenování a zařazení vizualních prohlídek, které můžou korespondovat s výše zmíněnými normami.

Definice prohlídek GVI, DET a SDI podle EASA.

GVI: Vizualní prohlídka vnitřního nebo vnějšího prostoru letadla. Kontroluje se zjevné poškození anebo absence konkrétní součásti. Tato prohlídka se provádí ze vzdálenosti „natažené ruky“ (inspektor musí na zkoumanou oblast dosáhnout). Pro kontrolu těžko přístupných míst je možné používat zrcátko. Tato úroveň kontroly se provádí za běžného osvětlení (denní světlo, hangárové osvětlení). Jako pomůcky můžou být použity žebříky, plošiny či lešení, k dosažení požadované vzdálenosti zkoumané oblasti. Pro provedení GVI může být nutné odstranění nebo otevření přístupových panelů.

DET: Detailní prohlídka konkrétního letadlového celku či součástí pro zjištění poškození nebo jakékoli nesrovnalosti. Může zahrnovat i hmatové posouzení. Běžné osvětlení je doplněno přímým zdrojem světla na zkoumanou část. Je povoleno používat zrcátka a zvětšovací čočky.



SDI: Kontrola konkrétní součásti, s pomocí speciální kontrolní techniky (NDT) anebo zařízení (boroskop, videoskop, tap test kladívko). Klasifikace SDI kontroly nedefinuje požadovanou kvalifikaci provádějící osoby.

#### 4.2.1 Všeobecná vizuální prohlídka.

Jestliže je vizuální prohlídka brána jako všeobecná kontrola, stačí pro její patřičné vykonání dostatečné osvětlení objektu a vzdálenost oka pozorovatele od pozorovaného předmětu není blíže specifikována (vzdálenost předepisuje výrobce letadla). I přes tuto definici, musí být zkoušená oblast ve vhodné pozorovací vzdálenosti. Účelem této kontroly je poskytnout pracovníkovi kompletní přehled o stavu zkoumané součásti. Musí se vykonávat **pouze** jako „přímá“ vizuální kontrola. Všeobecná kontrola se může provádět z větší vzdálenosti.

Příklady zaměření všeobecné vizuální kontroly:

- odhalování nánosů a usazenin (kontaminace, například provozní kapaliny => zjištění úniků)
- odhalování povrchové koroze
- kontrola lícování a tvarové odchylky
- odhalování mechanického poškození
- prověření připravenosti pro zahájení místní vizuální prohlídky

#### 4.2.2 Přímá vizuální kontrola

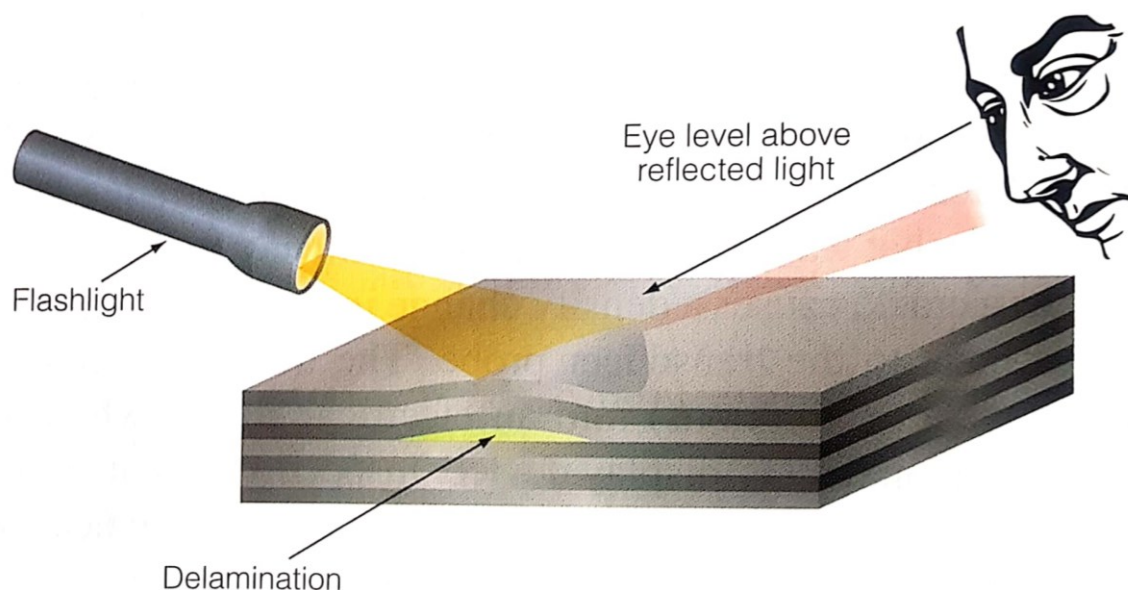
Je detailní kontrola struktury povrchu, při které není přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a sledovaným místem. Přímá místní vizuální kontrola se provádí pouhým okem nebo za použití optických přístrojů odpovídající definici normy pro přímou vizuální zkoušku (lupa, zrcátko, endoskop nebo optické vlákno používající přístroje) Tyto povolené přístroje se zpravidla používají tehdy, kdy není technicky možné dodržet normou vyžadované geometrické parametry pozorování.

Pro provedení místní kontroly, která je poměrně častou kontrolou, musí být vzdálenost oka pozorovatele od pozorovaného objektu maximálně 600 mm, přičemž intenzita osvětlení zkoumaného předmětu musí dosahovat minimální hodnoty 500 luxů. Úhel oka pozorovatele vůči zkoumané ploše, nesmí dosáhnout nižší hodnoty než 30°.

Pro dosažení čím jak nejlepší efektivity, je zapotřebí brát v úvahu následující:

- eliminovat oslnění, z tohoto vyplývá – použít intenzitu osvětlení se zřeteli na jeho reflektivnost

- použití nejvhodnějšího směru světla ke zkoumanému bodu
- optimální teplota chromatičnosti světelného zdroje



Obrázek 27 Přímá vizuální kontrola [9]

#### 4.2.3 Nepřímá vizuální kontrola.

Je kontrola struktury povrchu, při které je optická dráha mezi pozorovatelem a pozorovaným objektem přerušena.

Uplatní se tehdy, kdy dostačuje pouze vizuální kontrola, ale k sledovanému předmětu (lopatky turbíny), popřípadě místu (spalovací komora) není přístup. Nepřímou metodu používáme i v případě, že přímá vizuální kontrola přináší značné bezpečnostní riziko.

Pro provádění nepřímé vizuální kontroly používáme nástroje, které nám umožní vizualizaci nepřístupného místa (videoskopy, fibroskopy, fotoaparáty)

Nevýhodou vizuální prohlídky je její, do značné míry subjektivní vyhodnocení. Kvalita vyhodnocení je založena na fyzických a psychických predispozicích pozorovatele a současně na optických podmínkách (osvětlení, barva, jas, rozměr předmětu, kontrast...) Do kvality vyhodnocení také vstupuje stupeň kvalifikace pracovníka a jeho zkušenosti.

#### 4.2.4 Ověřování podmínek vizuální zkoušky

Spolehlivě a řádně provedená zkouška povrchových vad je provedená pouze za předpokladu, že byly dodrženy již zmíněné podmínky.

1. Intenzita osvětlení – kontrolujeme na povrchu zkoumané plochy s pomocí luxmetru.
2. Pomocné přístroje – před použitím potřeba zkontrolovat platnou kalibraci.
3. Zrak pracovníka – kontrola zraku alespoň jedenkrát ročně.

I v případě, že každá z uvedených kontrol byla řádně provedena, je v některých případech potřebné ověřit použitelnost metody jako celku.

#### **4.2.5 Vyhodnocení nálezů**

Úroveň nálezů se vyhodnocuje na základě různých parametrů. A to vždy podle konkrétního druhu materiálu, charakteristiky použití, zatížení a jiných vstupních atributů.

Nálezy můžeme rozdělit do dvou kategorií. Poškození v mezích tolerance (promáčklina, vryp) a poškození toleranci přesahující (trhlina, jsou obvykle nepřipustné). V případě poškození v mezích postupujeme podle nařízení výrobce letadla (SRM), který může nařídít pokračující NDT kontrolu pro zjištění a posouzení závažnosti. Oproti poškození nad povolenou toleranci, v tomto případě je další kontrola zcela zbytečná. Je nepřipustné, aby takto poškozená součást (celek) byla uvolněna do provozu.

### **4.3 Tap test inspekce**

Tap testing je jednou z nejstarší a nejjednodušší metodou NDT testování. Metoda spočívá v jemném poklepávání povrchu kompozitu, speciálně k tomu určeným kladívkem. Tímto poklepáváním zjišťujeme celistvost materiálu. Změny celistvosti jsou doprovázeny měnícím se tónem. Odlišná barva tónu signalizuje strukturální změny. Porušení delaminací se zpravidla vyznačuje dutým zvukem. Cílem tap testingu je tyto strukturální poruchy nalézt a místně označit pro pokračující zkoumání. Místo, ve kterém se tón začíná měnit, zakreslovat, signalizuje počátek poškození. Posoudit, zdali se jedná o poškození nebo nikoli, nám napomáhají porovnávací vzorky (etalony). Častou závadou sendvičových kompozitů jsou mikrotrhlina matrice, které se projeví naplněním voštin vodou. Tap testing je spolehlivou metodou pro odhalení této závady. Také u této metody je nutné respektovat a dodržovat zásady „Lidských činitelů“ (např. letecký mechanik s poškozením sluchu)

I když je tap testing vhodnou kontrolou kompozitních materiálů, má svá omezení. Proto musí být následně doprovázen dalšími NDT metodami, kterými jsou ultrazvuková inspekce anebo radiografické kontroly. Toto pokračující zkoušení dá technikovi rozsáhlejší představu o velikosti a hloubce vady.

Technik provádějící tap testing kontrolu, musí také pochopit její limity.

1. Nevhodnost použití pro poškození ve velkých hloubkách.
2. Potřeba znalosti struktury podkladového materiálu zkoušené části.
3. Ne příliš efektivní při rozsáhlém stupni poškození.
4. Neschopnost rozeznat a určit poškození malého rozsahu.



Obrázek 28 Obyčejné tap testing kladívko (vlevo) a Wichitech RD3 digitalní tap testing kladívko (vpravo). [9]

#### 4.4 Ultrazvuková kontrola (UT)

Ultrazvukové zkoušení materiálů je jedna z nejrozšířenějších nedestruktivních metod, s uplatněním nejen na kompozitních materiálech. Mimo detekci vnitřních vad struktury materiálu, dokáže UT metoda detekovat poškození povrchu a měřit tloušťku testované součásti. Ultrazvukové zkoušení je pro testování CFRP kompozitů nejvhodnější a také nejrozšířenější. V UT metodě a celkově v NDT dochází k neustálému vývoji nových a stávajících metod s použitím nejmodernějších technologií.

Samotné testování pomocí této NDT metody je založeno na vysílání ultrazvukových impulzů. Tyto vysokofrekvenční impulzy procházejí kontrolovaným předmětem a vzniklé změny procházejících signálů, zaznamenaných na obrazovce pozorujeme a vyhodnocujeme. Transformace signálu je způsobena interakcí samotných impulzů s materiálovým rozhraním, nehomogenitou a vnitřními vadami.

Ultrazvukový přístroj zaznamenává odrazy signálů od rozhraní nebo na nespojitosti materiálu. Můžeme měřit čas mezi vysláním a zpětným zachycením impulzu. Důležitou

veličinou je útlum, který vzniká absorpcí nebo samotným rozptylem při průchodu kompozitem.

#### 4.4.1 Teoretický úvod

Základem této nedestruktivní kontroly jsou samotné ultrazvukové vlny. Je to druh mechanického vlnění o minimálním kmitočtu 20 kHz. Pro kontrolu kompozitních materiálů se nejčastěji používá frekvence v rozsahu 1 až 20 MHz. Samotná frekvence závisí na použité technice zkoušení. Ultrazvuková vlna má sinusovou charakteristiku o vlnové délce ( $\lambda$ ) v jednotkách milimetrů. Rychlost ultrazvukového vlnění je rychlost, kterou se ultrazvuková vlna šíří v daném prostředí. Je závislá na elastických vlastnostech prostředí (modul pružnosti v tahu  $E$ , ve smyku  $G$ , Poissonově číslu  $\mu$  a hustotě  $\rho$ ). Proto je rychlost zvuku materiálovou konstantou „ $c$ “.  $c = f \times \lambda$

$c$  - rychlost zvuku,  $f$  – frekvence,  $\lambda$  – vlnová délka

Ultrazvuková vlna se šíří předmětem na základě zákonů odrazu a lomu. Jestliže vlna nenarazí na rozhraní anebo nehomogenitu, nemění svůj směr ani svou sílu. V případě, že narazí na anomálii, změní své vlastnosti skokově. Tato skoková změna může být způsobena jakýmkoliv rozhraním (přirozené zakončení materiálu, přechod mezi dvěma materiály)

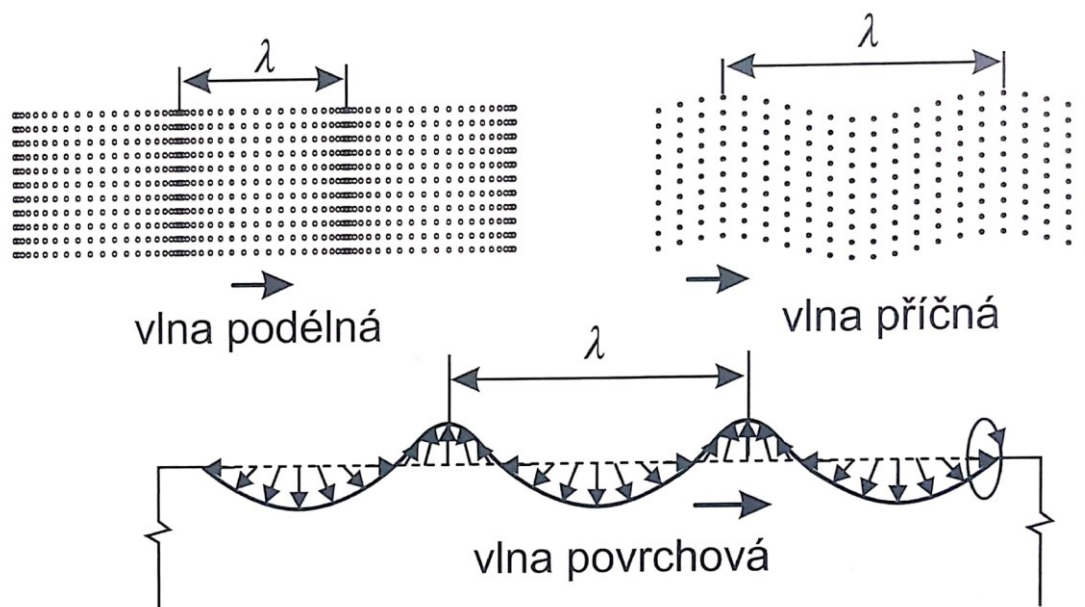
Ultrazvukové vlny můžeme rozdělit do dvou kategorií. Prvním dělením je podle tvaru vlnoplochy na rovinné, válcové a kulové. Druhý, podstatnější způsob je rozdělení podle orientace kmitání částic kontrolovaného prostředí vůči směru šíření vlny na příčné, podélné, deskové a povrchové vlnění.

**Podélné vlnění** (longitudinální) – je nejčastěji používaným vlněním. Částice kmitají shodným směrem jako vlna, prostředí se proměnlivě zředňuje a zhušťuje (objemové změny prostředí). Vlna se šíří v kterémkoli prostředí (kapalné, plynné, pevné).

**Příčné vlnění** (transverzální) – u příčné vlny je směr pohybu částic kolmý na směr šíření. Tyto vlny se mohou šířit pouze v pevných látkách a kapalinách s vysokou viskozitou, protože jenom v takovémto prostředí je možné přenést smykové zatížení. Má přibližně poloviční rychlost šíření oproti podélné vlně. Při zvětšení úhlu dopadu, se příčná vlna přemění na vlnu povrchovou. Tento úhel dopadu se nazývá Druhý kritický úhel.

**Povrchové vlnění** (Raleyghovy) – tento typ vlny se šíří pouze po povrchu, a to přibližně do hloubky o velikosti rovné vlnové délce. Částice vykonávají eliptický pohyb. Maximální energie vlny a tím pádem i amplituda je na povrchu zkoušeného tělesa. Rychlost šíření tohoto vlnění můžeme s velkou přesností odhadnout jako 0,92 rychlosti příčné vlny.

**Deskové vlny** (Lambovy) – se mohou šířit dvěma rozdílnými způsoby. Jako vlny symetrické (dilatační) a asymetrické (ohybové) v závislosti na tloušťce materiálu, frekvenci a úhlu dopadu. Protože deskové vlny mohou existovat pouze tehdy, prostupují-li celou tloušťkou součásti, jsou vhodné pouze pro zkoušení relativně tenkých dílů, jejichž tloušťka je srovnatelná s vlnovou délkou. Obdobně jako v deskách se mohou Lambovy vlny šířit i v tyčích nebo drátech. Rychlost Lambových vln však není materiálový parametr.



Obrázek 29 Znáznornění vln. [17]

#### 4.4.2 Měřicí techniky

I když existuje měřících technik více, můžeme je rozdělit na techniky průchodové a odrazové.

Průchodová technika spočívá v měření hodnoty energie ultrazvukových vln, které prošly testovaným materiálem. To znamená, že touto technikou nejsme schopni přesně lokalizovat vadu. Pro vykonání průchodového měření potřebujeme dvě sondy, kdy jedna je vysílací a druhá přijímací. Proto je zapotřebí volného přístupu k oběma stranám a přesného ustavení sond (naproti sobě).

Výhodou odrazové techniky je schopnost testování materiálu velké tloušťky a vysokým útlumem.

#### 4.4.3 Impulzová odrazová technika

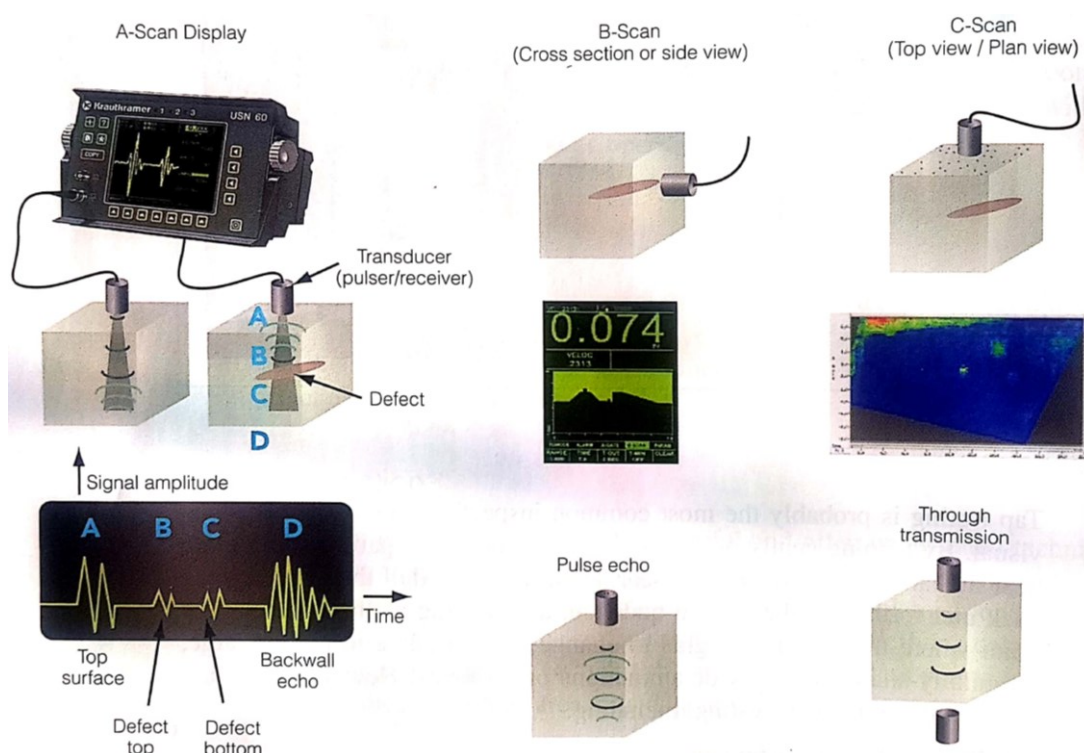
Tato technika je v dnešní době nejrozšířenější a nejpoužívanější měřící ultrazvukovou technikou, která dokáže přesně lokalizovat poškození



UT přístroj hodnotí čas průchodu materiálem a akustický tlak odražené ultrazvukové vlny.

Výsledné zobrazení získaných dat, může být zobrazeno několika možnostmi:

- A-Scan - nejčastější zobrazovací metoda, zobrazuje amplitudu signálu, dosaženou v bodě, v čase a taky hloubce kompozitu.
- B-Scan – primárně se uplatní tehdy, kdy je potřebné zjistit velikost, tvar a lokaci defektu. Zobrazuje vzdálenost, intenzita signálu je měřena rozdílem ech.
- C-Scan – sbírá a ukládá informace celou dobu pohybu sondy po ploše testovaného materiálu. Tímto dokáže dobře pozici a tvar vady.



Obrázek 30 Ultrazvukové testování [9]

#### 4.4.4 Ultrazvukové testovací zařízení

Základní ultrazvukový přístroj používaný pro impulsně odrazové zkoušení se skládá z:

- Synchronizátoru
- Zdroje napětí (vysílač – slouží k aktivaci měniče)
- Generátoru (zdroj časové základny)

- Přijímacího zesilovače a zobrazovacího systému (interpretuje přijaté ultrazvukové impulsy)
- Obrazovky (u analogových přístrojů CRT)

Jednotlivé operace jsou řízeny synchronizátorem, který spouští příslušné obvody. V čase  $t_0$  je spuštěn obvod časové základny a poté v čase  $t$  pomocí synchronizátoru vysílač. Vysílač vyšle napěťový impuls, jenž je v sondě převeden na ultrazvukovou vlnu. Ultrazvuková vlna se šíří zkoušeným materiálem a odráží se od rozhraní (zadní stěna nebo defekt) zpět do sondy, kde je převedena na přijímací impuls a dále vedena do zesilovače.

Ultrazvukové impulsy na vstupu zesilovače se zesilují jako impulsy vysokofrekvenční (VF) a v koncovém stupni zesilovače jako impulsy usměrněné (detekované), tzv. videoimpulzy, které jsou křivkou skutečných ultrazvukových ech přijímaných ze zkoušeného materiálu. Přijaté signály se často upravují pomocí filtrů, aby se usnadnila jejich interpretace. Pomocí omezovacích či ořezávacích obvodů je možné eliminovat signály o nízké úrovni vyvolané strukturou materiálu (šum). Zesílené signály jsou přiváděny na displej přístroje.

Je známo více možností vytvoření ultrazvukových vln (mechanické, elektromechanické). Elektromechanické způsoby jsou elektroindukční, magnetostrikční a pro NDT testování nejvhodnější piezoelektrické. Piezoelektrický způsob je založený na fyzikálních vlastnostech krystalu. Jestliže deformujeme krystal vnější silou, začne produkovat elektrickou energii. V případě, že přivedeme elektrickou energii na krystal, začne rezonovat a vysílat ultrazvukové vlny. Piezoelektrický způsob se hojně využívá, je základním prvkem ultrazvukových sond.

#### 4.4.5 Ultrazvukové sondy

Sondy dělíme podle orientace vysílaného vlnění na přímé a úhlové.

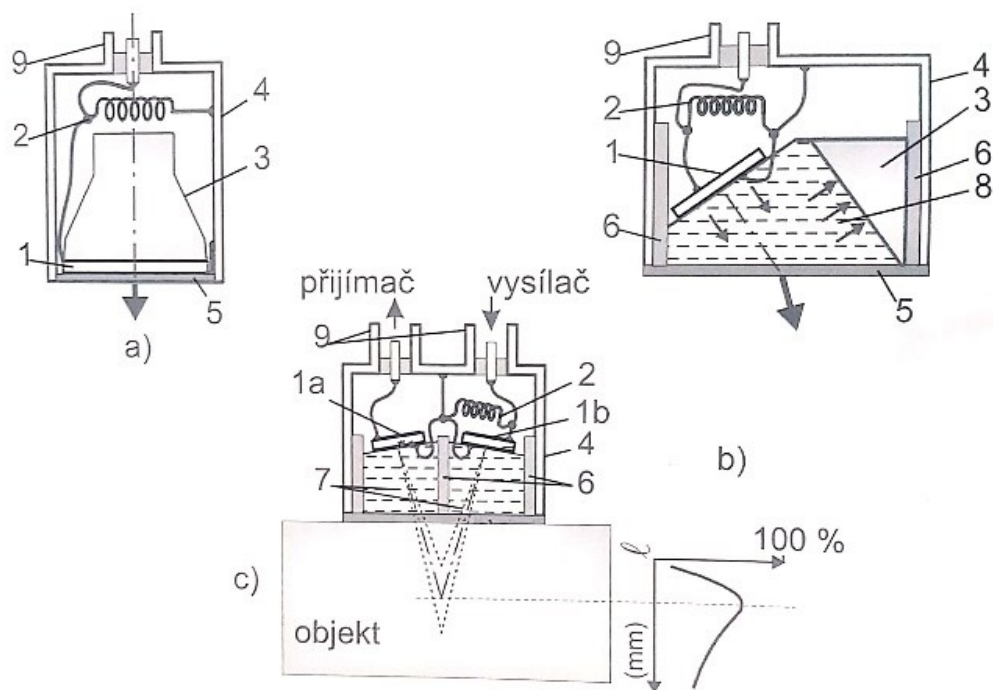
Každá ze sond se používá v jiném případě. Avšak nejčastěji, při kontrole kompozitů se používá přímá sonda.

**Přímá sonda** se vyznačuje vysokým výkonem vysílání a možností vysílat i přijímat jedním měničem. Dokáže odhalit vady kolmé na povrch součásti, a to i ve větších hloubkách.

**Zdvojená přímá sonda**, zdvojením přímé sondy dostaneme složitější podobu (dva měniče), v tomto případě jeden měnič pouze vysílá a druhý přijímá. Měniče musí být navzájem od sebe akusticky izolovány. Toto zdvojení umožní odhalit vadu v blízkosti povrchu materiálu.



**Úhlová sonda**, je to sonda, která dokáže vysílat ultrazvukové vlnění pod určitým úhlem. Nejčastěji však  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $70^\circ$ . Potřebný úhel je dosažený předsádkou, ta může být pevná nebo výměnná (kombinace přímé sondy s předsádkou). Odhaluje vady orientované zešikma k k povrchu a v místech nedostupných pro přímou sondu.



Obrázek 31 Ukázka piezoelektrických ultrazvukových sond [13]

*Popis výše uvedeného obrázku: Pozice „a“ zobrazuje jednoduchou přímou sondu, pozice „b“ – úhlovou sondu, „c“ – dvojí sonda.*

#### 4.4.6 Phased Array (UT-PA)

Jedná se o poměrně novou možnost ultrazvukové kontroly, která může značně snížit dobu trvání inspekce. Zároveň poskytuje vynikající detekci malých defektů i schopnost určit jak polohu, tak hloubku poškození.

Klíčovým prvkem této metody je sonda vybavená více měniči. Každý měnič má vlastní zdroj a přijímač. Sondy mohou být uspořádány v různém seskupení, nejčastěji lineárně. Až všechny najednou vytváří ultrazvukovou vlnu. Vytvořenou vlnu lze pomocí elektronického řízení a časového zpoždění dílčích impulsů pod úhlem nasměrovat anebo zamířit na konkrétní místo.

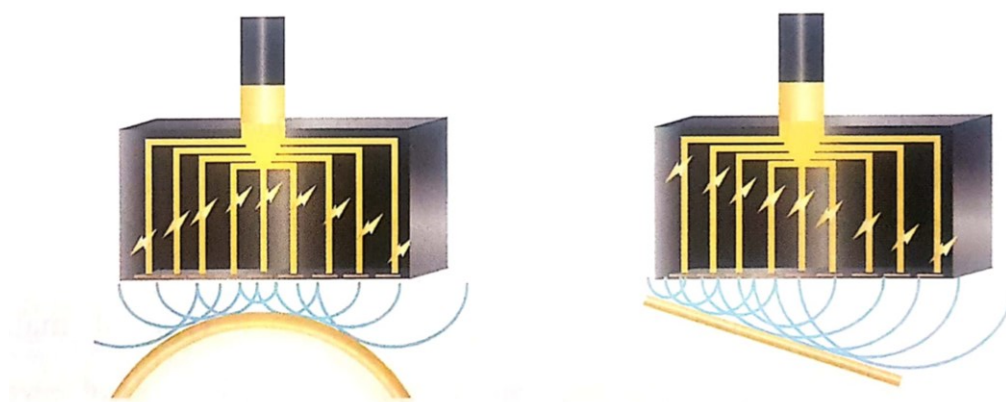
Technika phased array je založena na tradiční ultrazvukové metodě, jsou všeobecné zákonitosti prakticky totožné. Rozdíl je v tom, že paprsek phased array sondy je fokusovaný (zaměřený) a multi-úhlový.

Výhody Phased array:

- úspora času
- jediná sonda pro přímé zkoušení nebo pod úhlem nebo zaměření
- kvalitnější vyhodnocení objemových vad
- pokryje bezmála celou zkoušenou oblast

Nevýhody Phased array:

- složitá technika a její obsluha (nastavení parametrů)
- vyšší požadavky na zkušenosti obsluhy
- nižší výkon signálů
- finanční náročnost

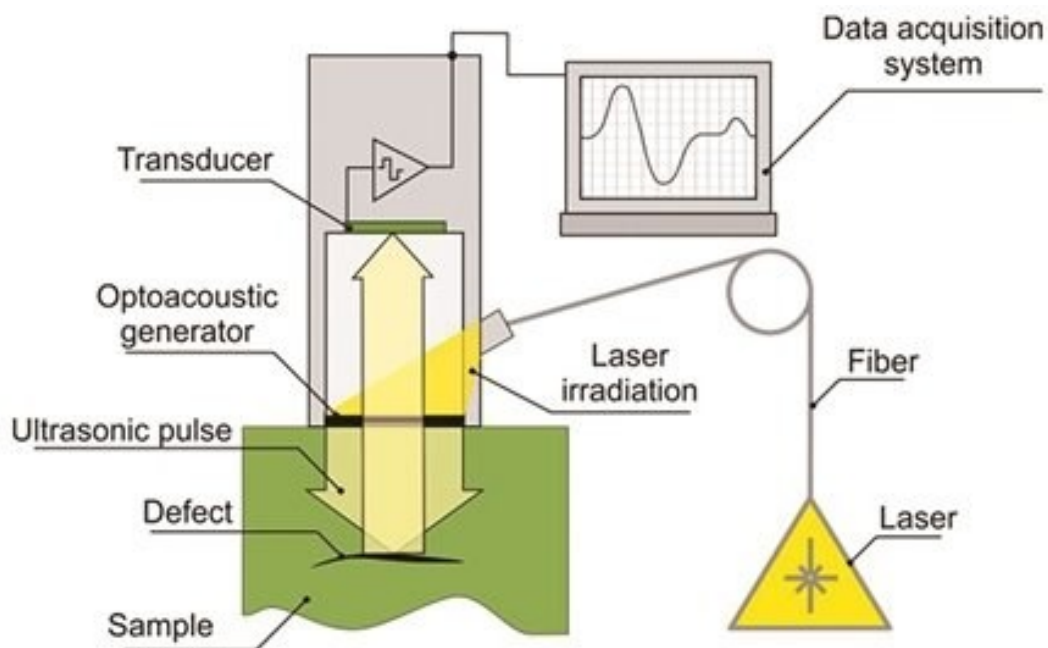


Obrázek 32 Ukázka vyzařování sondy Phased array [9]

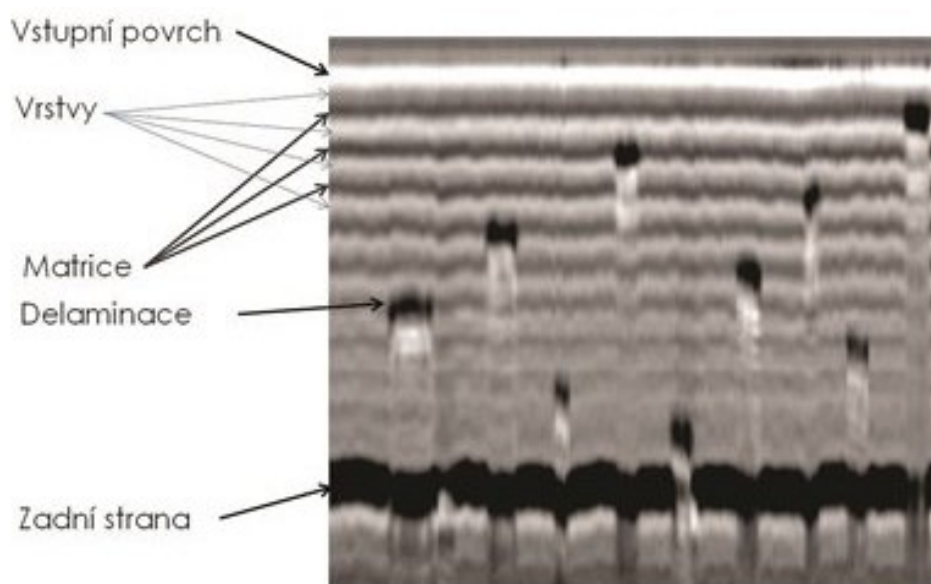
#### 4.4.7 Laserem buzený ultrazvuk

Je ultrazvukové vybavení, které vybuzuje ultrazvukový pulz laserem. Takto vybuzený pulz je posléze snímán vysoce-šírokopásmovým PVDF (optoakustický měnič) měničem, který je součástí sondy. Pro vytvoření ultrazvukového pulzu je používán tzv. Q-spínaný pevnolátkový Nd:YAG laser. Laserový pulz dosahující energie 10 – 20 mJ s trváním 10 ns je přiváděn optickým vláknem do sondy, kde je termoelastickou expanzí vyvolán ultrazvukový pulz v trvání od 10ns do 100ns. Takto vzniklý pulz je vyslán dvěma

protilehlými směry, jeden do piezoelektrického přijímače a druhý směrem do materiálu, který je akusticky spojen s vysílačem. Obdržený signál je digitalizován a zaslán do počítače.



Obrázek 33 Schéma laserem buzeného ultrazvuku [1]



Obrázek 34 B-sken delaminace desetivrstvého uhlíkového kompozitu [1]

Tato metoda zjišťování strukturálních vad je prozatím ve fázi testování. Na základě již získaných poznatků a výsledků, můžeme předpokládat budoucí aplikaci této technologie jak

při výrobě, tak i za provozu. Výhodou CLUE metody je vyšší rozlišovací schopnost než konvenční ultrazvukové technologie, detailnější zobrazení struktury kompozitních dílů.

Pro kontrolu uhlíkových kompozitů sendvičového typu, můžeme použít hojně používanou ostříkovou metodu (ultrasonic squirters), ta se vyznačuje v celku vysokou rychlostí zkoušení. Byla vyvinuta převážně pro velké plochy, jako jsou křídla nebo trup letadla.

#### **4.4.8 Imersní zkoušení**

Je hojně využívanou technikou pro kontrolu kompozitů. Imersní zkoušení využívá sloupec kapaliny (nejčastěji voda) jako vazební prostředí pro přenos ultrazvukového svazku ze sondy do zkoušeného materiálu, přičemž sonda není v přímém kontaktu s materiálem. Proto imersní zkoušení zaručuje konstantní podmínky vazby při kontrole, což je důležité zejména pro zkoušení součástí pravidelného tvaru (desky, trubky, tyče, kotouče apod.). Při imersním zkoušení se sondy musí udržovat ve stálých polohách vůči materiálu, proto se upínají do přesných držáků sond.

Imersní zkoušení se používá zejména pro mechanizovanou, polo-automatizovanou a automatizovanou kontrolu. Tím je poskytnuta větší spolehlivost zkoušení a optimální pokrytí zkoušeného kusu.

Výhody imersního zkoušení:

- Konstantní vazební podmínky
- Vyšší rychlost zkoušení
- Schopnost fokusovat ultrazvukový svazek
- Libovolný úhel prozvučování
- Menší opotřebení sond

Všechny tyto faktory mohou vést ke zvýšení citlivosti a spolehlivosti zkoušení. Většina imersního zkoušení používá jednoduché ploché sondy nebo sondy s fokusujícími čočkami.

Velkou výhodou tohoto zkoušení je možnost použít jedno zkušební zařízení (sondu) pro mnoho variant inspekčních předpisů (úhly zkoušení), ale vyžaduje relativně drahé systémy a významně prodlužuje přípravné časy pro zkoušení.

Jelikož se imersní zkoušení používá pro zkoušení materiálů s vyšší citlivostí, za konstantních podmínek vazby a zejména za vyšších rychlostí zkoušení, využívají se různé stupně mechanizace a automatizace kontrolního systému.

Sondy používané pro imerzní zkoušení musí být vyrobeny pro tento účel.

Dalšími typy ultrazvukových technik jsou Rezonanční technika, PITCH CATCH (deskové vlny) a Mechanical Impedance Analysis (MIA) NDT.

Technologie a možnosti NDT zkoušení se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Například novinkou v NDT testování uhlíkových kompozitů je metoda vířivých proudů. Ve stádiu výzkumu a vývoje je tzv. Shearografie, která by měla být časově nenáročná.

Častým problémem při vývoji nových technologií, je jejich uplatnění a aplikace v praxi. Nezřídka se stává, že vybavení potřebné pro provedení zkoušky není dostatečně mobilní, může mít velké rozměry nebo vzhledem ke svému technickému řešení (tvar, hmotnost...) je v určitých místech nepoužitelné (vysoko položená křídla, trup, ocasní plochy atd.). Proto se může stát, že v praxi nějakou technologii, byť i modernější, lepší, bohužel nepotkáme.

## 5 Postupy opravy kompozitu typu CFRP použitého na konstrukci velkého letadla.

Postupy oprav letadlových konstrukcí, se řídí SRM (structural repair manual) manuálem. Tuto podpůrnou dokumentaci vydává a spravuje držitel typové certifikace (obvykle výrobce letadla). Na základě možných poškození kompozitního materiálu v průběhu provozu letadla, výrobce vydá postupy oprav takto očekávaného defektu. Mnohdy se letecký technik setká s poškozením, které přesahuje popsané tolerance nebo se v manuálu vůbec nenachází. V tomto případě je nutná konzultace případné opravy s výrobcem letadla.

### 5.1 Oprava kompozitního materiálu.

Na ukázkou postupu a provedení opravy jsem použil odlehčovací plochu výškového kormidla z letadla SAAB 340. Jedná se o vyřazený řídicí prvek z důvodu rozsáhlého poškození a nerentability jeho opravy. Za darování tohoto dílu, poskytnutí prostředků a prostoru na opravu děkuji společnosti J.T.S Aviation Europe s.r.o..

### 5.2 Dílčí kroky

- 1 Prohlídka dílu.
- 2 Práce s technickou dokumentací SRM, příprava před opravu.
- 3 Postup opravy.

#### 5.2.1 Prohlídka dílu

Před samotnou opravou musí vždy předcházet vyhledání poškození. Poškození se vyhledává na očištěném dílu. V mém případě bylo plně dostačující použít vizuální prohlídku. Konkrétně detailní prohlídku klasifikovanou jako DET. Pro zjištění možné delaminace se použije metoda TAP TEST.



*Obrázek 35 Ukázka zjištěného poškození, patrný průraz a s tím spojená delaminace.*



### 5.2.2 Práce s technickou dokumentací (SRM), příprava před opravou.

Po zjištění nálezu jsem se podrobně seznámil s SRM (SRM 51-70-51-002), abych věděl jak postupovat. Bylo zapotřebí zjistit tolerance přípustného poškození a dohledat následný postup. V tabulce popisující vady na jednotlivých částech letadla, jsem vyhledal kolonku Trim tab (odlehčovací plocha). Zde je napsáno, že přípustná velikost poškození tohoto dílu je Ø1,5 " což je 3,81 cm.

Dále je zmíněno omezení:

- Vzdálenost mezi jednotlivými opravami musí být větší než 6" (15,24 cm).
- Oprava nesmí být provedena ve vzdálenosti menší než 6" (15,24 cm) od závěsů odlehčovacího kormidla.

# SAAB 340

Operator: Airst, MSN: 007, ACR: ES-LSG

## Structural Repair Manual

ITEM	MAX DAMAGE SIZE	TYPE OF DAMAGE AND REPAIR					RESTRICTIONS
		CRACKS	GOUGES NICKS	DENTS	HOLES PUNCTURES	DELAMINATION	
Trim tab	Ø 1.5 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					6 in between repairs. No repairs within 6 in from hinges.
Fairings	Ø 3.0 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					-
RUDDER							
Leading Edge	Ø 1.5 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					12 in between repairs. No repairs within 6 in from hinges.
Skin Panels	Ø 3.0 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					6 in between repairs. No repairs within 6 in from hinges.
Trailing Edges	Ø 1.5 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					6 in between repairs.
Trim tab	Ø 1.5 in	Repair, if damage is within given restriction, Ref. SRM 51-70-50					6 in between repairs. No repair within 6

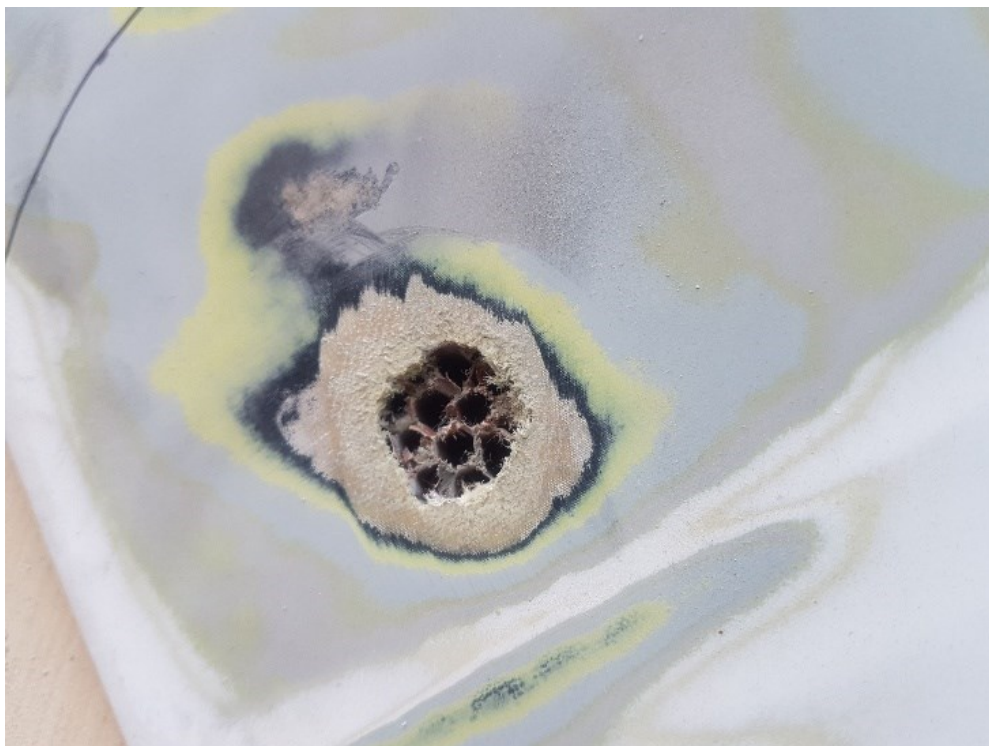
Obrázek 36 Ukázka tabulky poškození [20]

Z uvedeného obrázku, zobrazující průřaz je patrné, že poškození nepřesáhne maximální povolený průměr. Na základě výše uvedeného přecházím na odkaz Ref. SRM 51-70-50, kde najdu informace týkající se postupu, doporučeného náradí a předepsanou chemii, potřebnou pro vykonání opravy.

Protože při broušení vzniká jemný a zdraví nebezpečný prach, je důležité provádět tyto činnosti na odděleném místě (pracovišti), a to s patřičnou ochranou zdraví pracovníka.

### 5.2.3 Postup opravy

Zbroušení ochranného nátěru a následné vyfrézování průrazu až na úroveň, kde materiál nevykazuje porušenou soudržnost. Je potřeba odstranit veškeré delaminované části a úlomky, ale pouze v rozsahu nezbytně nutném.



*Obrázek 37 Zbroušené a vyfrézované poškození.*

Pro kontrolu velikosti poškození přeměřím, zda vyfrézované místo nepřevyšuje toleranci uvedenou v tabulce poškození.



*Obrázek 38 Přeměření vyfrézovaného místa*



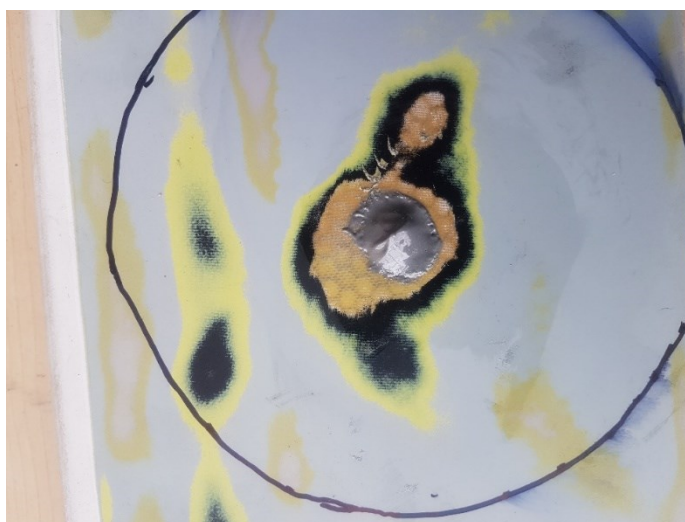
Před samotným vyplnění díry, je potřeba odstranit prach a zbytky materiálu. Doporučuje se použít vysavač. Místo očistíme a odmastíme přípravkem Methyl-Ethyl-Ketonem (MEK).

Díru vyplníme speciální adhesivní pastou Hysol EA 9394S. Vyplnění provedeme mírně nad povrch kompozitu. Vzniklou vyvýšeninou po vytvrdnutí odbrousíme. Je důležité dodržet správný hmotnostní poměr dvousložkového přípravku, který je uveden na plechovce adhesivní pasty Hysol, a to 100 jednotek části A ku 17 jednotkám části B.



*Obrázek 39 Adhesivní pasta Hysol EA 9394S*

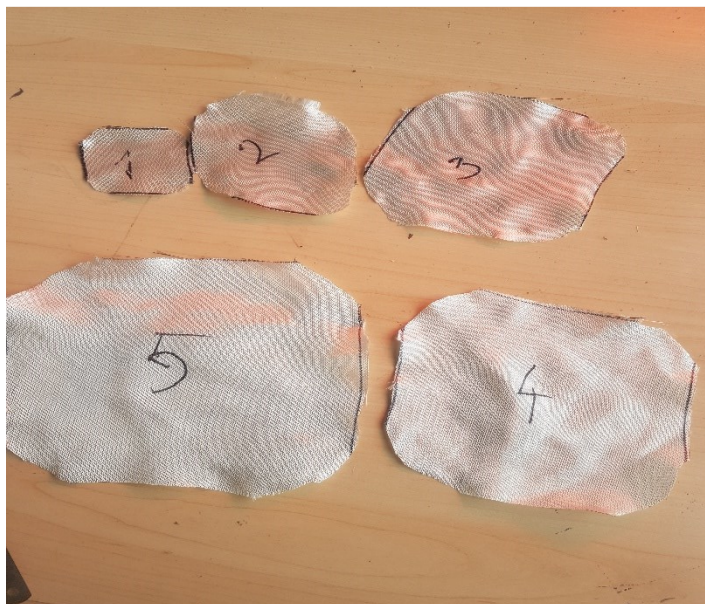
Pro urychlení vytvrdnutí se používá infračervený zářič. Hysol EA 9394S vytvrdne a je brousitelný při teplotě 77° C za 95 minut.



*Obrázek 40 Díra vyplněná adhesivní pastou Hysol*

Po vytvrdnutí a jemném zbroušení adhesivní pasty do roviny s potahem kompozitu odstraníme vzniklý prach a očistíme Methyl-Ethyl-Ketonem.

Dalším krokem je příprava tkaniny. SRM manuál udává pět vrstev kruhového tvaru s přesahem každé vrstvy 0,5" což je cca 13mm. Neporušený kompozit se skládá ze tří vrstev. Pro provedení opravy je potřeba vrstev čtyř. Čtvrtá vrstva je pro zvýšení pevnosti samotné opravy a pátá vrstva je tzv. „extra“ vrstva, s kterou je počítáno, že bude zbroušená před následnou povrchovou úpravou, proto se s ní plnohodnotně nepočítá.



Obrázek 41 Připravená tkanina před nasycením pryskyřice

Po nachystání plátků tkaniny přejdeme k namíchání dvousložkové pryskyřice Araldit LY/HY 5052, která má mísicí poměr 1:1. Obě složky je nutné důkladně promíchat.



Obrázek 42 Pryskyřice Araldit



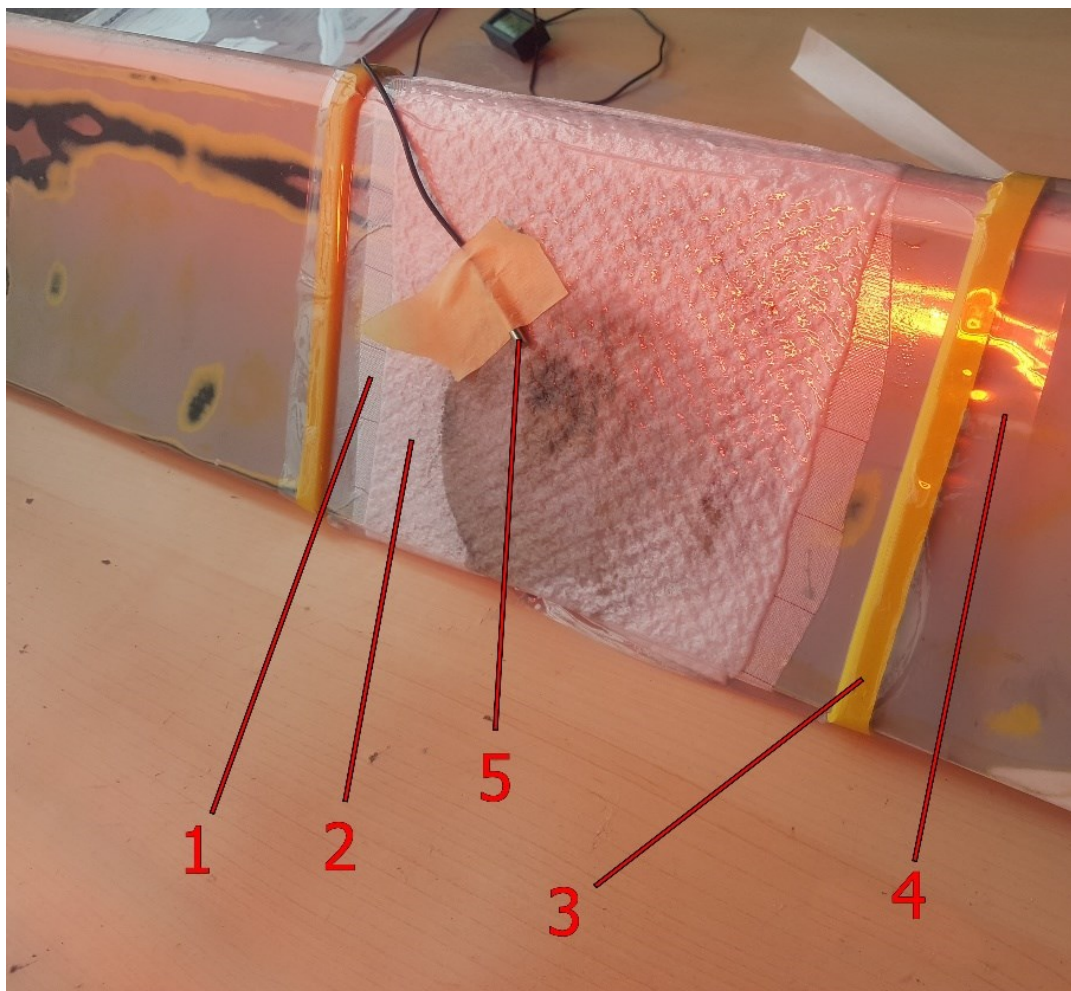
Po důkladném promíchání přecházíme ke smáčení vrstev tkaniny. Kvalitní smočení je velmi důležité pro budoucí kvalitu opravy. Tkaninu namáčíme do namíchané pryskyřice a klademe na předpřipravené a odmaštěné poškození. Správné smočení poznáme, když tkanina bílé barvy jakoby „zprůhlední“. Výrobce letadla nestanovuje směr orientace kladení vláken ani jejich pootáčení mezi jednotlivými vrstvami. Z tohoto důvodu jsem zvolil kladení vláken ve směru odtokové hrany, s nulovým pootáčením každé vrstvy (pootáčení jednotlivých vrstev tkaniny se aplikuje pro dosažení požadované pevnosti opravy ve všech směrech).



*Obrázek 43 Nasycená tkanina kladená přes poškození v pěti vrstvách*

Protože v průběhu kladení vrstev tkaniny vznikají v pryskyřici nežádoucí bublinky vzduchu, je nezbytné použít vakuové čerpadlo. Před aplikací hadice čerpadla pokryjeme opravu separační fólií (tato fólie zabrání přilepení k pryskyřici), separační fólii překryjeme

prodyšnou tkaninou, která zabezpečí rovnoměrné odsávání vzduchu. Po obvodu nalepíme těsnící pásku. Tato páska utěsní jak místo opravy, tak i samotnou hadičku vývěvy.



*Obrázek 44 Vytvrzování pryskyřice pod infračerveným zářičem*

- 1 – Separační fólie
- 2 – Prodyšná tkanina
- 3 – Těsnící páska
- 4 – Krycí fólie
- 5 – Teploměr

Odsávání probíhá po celou dobu vytvrzování pryskyřice. Doba tvrdnutí je závislá na teplotě. Při teplotě 60°C epoxid vytvrdne za 40 – 55 minut.

Po uplynutí požadované doby se započtenou rezervou odstavíme infračervený zářič, odstraníme krycí průhlednou fólii a strhneme separační fólii. Opravu necháme vychladnout.



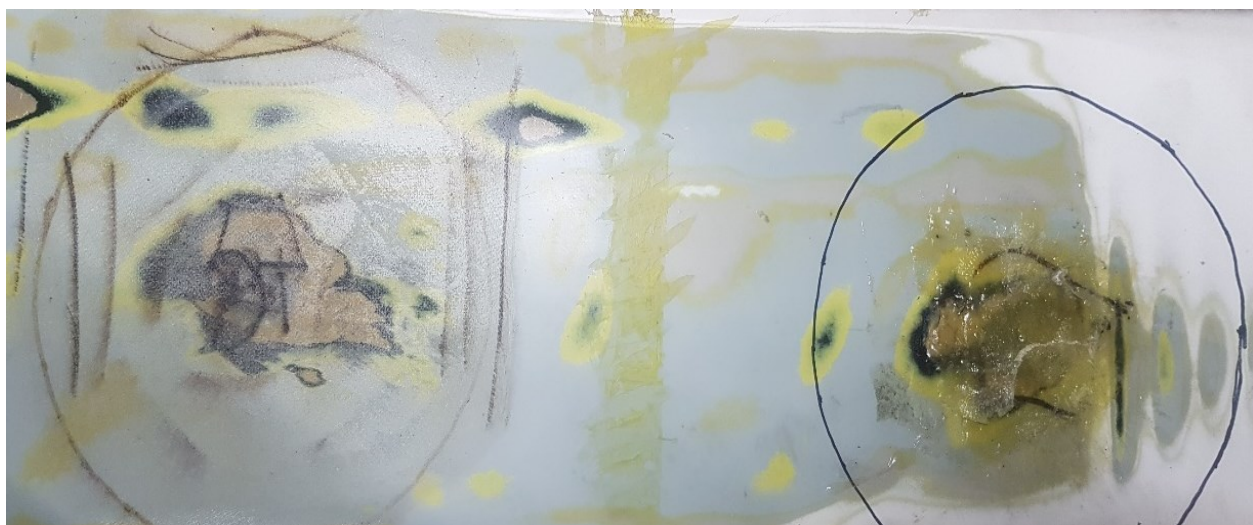


*Obrázek 45 Vytvrdlý epoxid*

Tímto je samotná oprava ukončena. Posledním krokem je přebroušení pásy vrstvy tkaniny do hladka (pozor na probroušení) a přichystání pro povrchovou úpravu. První se stříká vrstva černého antistatického laku, poté nástrík základní barvy a finální krycí lak.

Protože opravená vyvažovací plocha bude využita k budoucí výuce, rozhodl jsem se, že nástrík aplikovat nebudu.

Pro představu, jak důležité je dodržovat technologický postup a používat předepsanou chemii, provedl jsem opravu, která nebyla realizována podle stanoveného postupu.



*Obrázek 46 Porovnání oprav*

Na obrázku vpravo je oprava, při níž nebyl dodržen SRM manuál. Je víc než jasné, že stav je nevyhovující. Protože nebyla použita vakuová pumpa ani správná pryskyřice, jednotlivé vrstvy tkaniny se nespojily a nevykazovaly dostatečnou kohezi.

## 6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ukázat problematiku vyhledávání a oprav poškození kompozitních materiálů typu CFRP a možnou realizaci opravy. V průběhu opravy jsem si uvědomil finanční i časovou náročnost. I když se z pohledu SRM manuálu může zdát, že postup a samotná oprava je jednoduchá, není tomu tak. Je potřeba dát velký pozor při broušení. Neboť neopatrným broušením může být znehodnocena jak oprava, tak i samotný díl. Problémem v realizaci praktické části této bakalářské práce byly mé malé praktické zkušenosti s kompozitními materiály. I tento poznatek, v obecné rovině, bude mít v blízké budoucnosti (ihned, když začnou přicházet do údržby nová letadla s velkým podílem kompozitů v konstrukci draku) velký vliv na kvalitu prováděné údržby leteckými mechaniky, kteří ve své přípravě ještě nebyli dostatečně teoreticky a prakticky připraveni na tyto moderní typy materiálů. Významným je také poznatek o důsledném dodržování stanovených technologií (okolní teplota, čas, příprava materiálů, čistota atd.).

Všechny výše uvedené poznatky je možné, kromě jiného, využít pro aktualizaci výukových programů přípravy leteckých technických odborností.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Karlu Szydłowskému za odborné vedení práce, poskytnutí cenných rad a připomínek a za vstřícnost při konzultacích a vypracovávání práce.



## Zdroje

- 1 *Advanced Technology Group: ATG* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/>
- 2 *Airbus Composite Structures* [online]. **2007**, 43 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: [https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Wednesday\\_945\\_Thevenin.pdf](https://www.niar.wichita.edu/niarworkshops/Portals/0/Wednesday_945_Thevenin.pdf)
- 3 *Aramid Fiber (presented by Fibremax Ltd)* [online]. [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <http://www.aramid.eu>
- 4 *Aviation* [online]. 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: [www.aviation.stackexchange.com](http://www.aviation.stackexchange.com)
- 5 BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- 6 DAŘOUREK, Karel. *Druhy vláken* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6015062-Druhy-vlaken-technicka-univerzita-v-liberci-kompozitni-materialy-5-mi-doc-ing-karel-dadourek-2008.html>
- 7 DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- 8 DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-972-4.
- 9 DORWORTH, Louis C., Ginger L. GARDINER a Greg M. MELLEMA. *Essentials of advanced composite fabrication and repair*. Newcastle, Wash.: Aviation Supplies & Academic, c2012. ISBN 978-1-56027-752-1.
- 10 DRAXLER, Karel. *Aerodynamika, konstrukce a systémy letounů: studijní modul 11*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005-. Učební texty pro teoretickou přípravu osvědčujícího personálu údržby letadel dle předpisu JAR-66. ISBN 80-7204-367-6.
- 11 EASA IP122. *EASA* [online]. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/IP122%20Rev%202.pdf>
- 12 EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- 13 KREIDL, Marcel. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha: Starmans electronics, 2011. ISBN 9788025466063.

- 14 LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-86073-82-3.
- 15 NASA TECHNOLOGY TRANSFER PROGRAM [online]. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://technology.nasa.gov/>
- 16 PETRÁČKOVÁ, Věra a Jiří KRAUS. *Akademický slovník cizích slov: [A-Ž]*. Praha: Academia, 1997. ISBN 80-200-0607-9.
- 17 REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 9788073004668.
- 18 *Silicon Carbide Fiber and Its Application to Ceramic Matrix Composites* [online]. 2018 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://www.ceramicsexpousa.com/site/presentations/silicon-carbide-fiber-and-its-application-to-ceramic-matrix-composites.pdf>
- 19 SIMHA-MARTYNKOVÁ, Grażyna. *Carbonaceous materials in composites*. Ostrava: Repronis, 2008. Nanotechnologie a nanomateriály. ISBN 978-80-7329-174-7.
- 20 SRM manuály SAAB 340, Airbus A320
- 21 ŠKEŘÍK, M. a P. MAŘÁNEK. *Vizuální metoda stupeň I, II.: ATG s.r.o.* Praha, 2014.
- 22 THOMAS, Sabu, Kuruvilla JOSEPH, S. K. MALHOTRA, Koichi GODA a M. S. SREEKALA. *Polymer composites*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2014. ISBN 978-3-527-32980-9.
- 23 ŽBÁNEK, Petr a Alexandr A. KARABUTOV. *Zkoušení uhlíkových kompozitů laserem buzeným ultrazvukem* [online]. 2016, 10. 2. 2016 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zkouseni-uhlikovych-kompozitu-laserem-buzenym-ultrazvukem.html>